

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Numerická simulace deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření**

**Numerical simulation of material deformation in the marginal strain**

Ladislav Lesák

**KSP – TP**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – *TU v Liberci*

### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 84

Počet tabulek: 3

Počet příloh: 6

Počet obrázků: 69

**Datum:** 6.1.2012



## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**Jméno a příjmení**

**Ladislav L E S Á K**

**Studijní program**

**M2301 Strojní inženýrství**

**Studijní obor**

**2303T002 Strojírenská technologie**

**Zaměření**

**Tváření kovů a plastů**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Numerická simulace deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Základy technologie tažení plechu (stavy napjatosti, mezní deformace materiálu).
2. Využití simulačních programů v oblasti lisování (seznámení se s programem PAM STAMP 2G, možnosti využití, okrajové podmínky, matematické výpočtové modely atd.).
3. Využití systémů bezkontaktní analýzy technologických procesů v průmyslové praxi (systém ARAMIS, ARGUS, PONTOS).
4. Experimentální zjištění rozvoje deformace hlubokotažného materiálu v oblasti mezních přetvoření pomocí systému ARAMIS.
5. Provedení numerické simulace mezního stavu deformace pomocí software PAM STAMP 2G.
6. Vyhodnocení shody experimentálně zjištěných hodnot deformace a hodnot získaných numerickou simulací.
7. Závěr.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: cca 50 stran
- grafické práce: grafy, tabulky

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PEARCE,P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5.
- [2] ASM HANDBOOK 14B. Sheet metal forming, ASM INTERNATIONAL 2004, ISBN-13:978-0-87170-710-9.
- [3] Analýza přetvoření výlisku vnitřních bočních dveří, [Výzkumná zpráva], TUL Liberec, 2006.
- [4] BAREŠ,K. a kol.: Lisování, SNTL Praha, 1971.
- [5] BUCHAR,Z.: Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů, [Habilitační práce], TU v Liberci, 1996.
- [6] Uživatelské manuály pro simulační software PAM STAMP 2G.
- [7] PEŠEK, L.: Videoextensometry - application in materials research, In: Development of materials science in research and education (DMS-RE 2003 - 13. joint seminar), s.59-60, 15.-19.9.2003, Račková dolina, SR.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.



prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 29. 10. 2011

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data ( v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

# **A N O T A C E**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**

**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Ladislav Lesák

Téma práce: Numerická simulace deformace materiálu v oblasti  
mezních přetvoření

Numerical simulation of material deformation in the  
marginal strain

Číslo DP: KSP – TP

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – *TU v Liberci*

## **Anotace:**

Diplomová práce se zabývá využitím simulačního programu PAM – STAMP<sup>TM</sup> 2G pro analýzu deformací při tažení plechů. Analýza probíhala po stanovení potřebných materiálových vlastností zkoušeného materiálu.

## **Annotation:**

Thesis deals with usage the simulation programme PAM - STAMP<sup>TM</sup> 2G for analysis deformations in drawing sheet metals. Analysis proceeded after assessment of necessary material properties of the test material.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 6. Ledna 2012

.....

Ladislav Lesák  
Březenská 681  
507 43 Sobotka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za pomoc při řešení této diplomové práce a cenné připomínky v průběhu jejího řešení. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi mé diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jeho ochotu a poskytnuté rady.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za jejich podporu při mém studiu na vysoké škole.

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Teoretická část .....	9
2.1	Technologie tváření kovů .....	9
2.2	Technologie plošného tváření – tažení .....	9
2.2.1	Princip tažení plechu .....	10
2.2.2	Vznik vln při tažení .....	10
2.2.3	Napětí a deformace při tažení .....	12
2.2.4	Technologická tvářitelnost při plošném tváření .....	13
2.3	Zkouška tahem – mechanická zkouška plechů .....	14
2.4	Anizotropie .....	17
2.5	Tribologie a mazání .....	20
2.6	Fyzikální a numerické modelování plošného tváření .....	23
2.6.1	Míry deformace tělesa .....	25
2.6.2	Míry napjatosti .....	25
2.6.3	Základy metody konečných prvků .....	26
2.6.4	Popis deformace skořepiny – Mindlinova hypotéza .....	27
2.7	3D optické měření deformace při tváření materiálu .....	28
2.7.1	Analýza pomocí optického systému ARGUS .....	28
2.7.2	Analýza pomocí optického systému ARAMIS .....	32
2.7.3	Analýza pomocí optického systému PONTOS .....	36
2.8	Diagramy mezních přetvoření .....	39
2.8.1	Definice diagramů mezních přetvoření .....	39
2.8.2	Diagramy mezních přetvoření stanovené početními metodami .....	42
2.8.3	Určování diagramů mezních přetvoření experimentálním způsobem .....	43
2.8.4	Určování mezního stupně přetvoření .....	46
2.9	Popis programu PAM-STAMP <sup>TM</sup> 2G .....	50
3	Praktická část .....	51
3.1	Stručná charakteristika praktické části .....	51
3.2	Volba materiálu pro experimentální část .....	52
3.3	Stanovení mechanických hodnot materiálu .....	52
3.3.1	Stanovení materiálových hodnot zkouškou tahem .....	52
3.3.2	Získání hodnot deformací pomocí systému ARAMIS .....	57
3.3.3	Simulace v programu PAM – STAMP <sup>TM</sup> 2G .....	61
3.3.4	Simulace deformace pomocí dat za mezí pevnosti .....	69
4	Diskuze výsledků .....	79
5	Závěr .....	80
6	Použitá literatura .....	82
7	Seznam příloh .....	84

### Seznam použitých zkratk a symbolů:

$A_g$	[%]	rovnoměrná tažnost
$F$	[N]	tvářecí síla
$N$	[-]	matice tvarových funkcí
$n$	[-]	exponent deformačního zpevnění
$m_\sigma$	[-]	ukazatel stavu napjatosti
$m_\varphi$	[-]	ukazatel stavu přetvoření
$p$	[MPa]	přidržovací tlak
$q$		vektor zobecněných posuvů
$r$	[-]	součinitel normálové anizotropie
$r_0$	[-]	součinitel normálové anizotropie ve směru válcování $0^\circ$
$r_{45}$	[-]	součinitel normálové anizotropie ve směru válcování $45^\circ$
$r_{90}$	[-]	součinitel normálové anizotropie ve směru válcování $90^\circ$
$\Delta r$	[-]	součinitel plošné anizotropie
$v$	[m/s]	rychlost tváření
$\varepsilon$	[-]	poměrná deformace
$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$\mu$	[-]	součinitel tření
$\sigma_H$	[MPa]	střední napětí
$\sigma_1$	[MPa]	radiální napětí
$\sigma_2$	[MPa]	tlakové napětí
$\sigma_3$	[MPa]	tlakové napětí tečné
$\varphi_{ik}$	[-]	kritická intenzita přetvoření
CAD		Computer Aided Design
CAE		Computer Aided Engineering
CCD		Charge Coupled Device
DMP		Diagram Mezních Přetvoření
FEM		Finite Element Method
FLD		Forming Limit Diagram
FLC		Forming Limit Curves



# 1 Úvod

Automobilový průmysl tvoří v současnosti důležité průmyslové odvětví prakticky všech vyspělých států světa, protože do tohoto průmyslového odvětví spadá vývoj, výroba, marketing a prodej vozidel. Na automobilovém průmyslu jsou závislí subdodavatelé a to jak ze strojírenského průmyslu, tak i z elektrotechnického, chemického, hutního a těžebního průmyslu. Co se týče České republiky, tak zde automobilový průmysl představuje jedno z nejrozvinutějších odvětví. Důkazem je počet automobilek, které se rozhodli na našem ne příliš velkém území otevřít své továrny. Díky tomu se v roce 2010 podařilo překonat hranici jednoho milionu vyrobených vozidel.

Na prodej automobilu má kromě pořizovací ceny velký vliv jeho tvar a design karoserie. Při návrhu nového modelu automobilu je na prvním místě zvyšování aktivní a pasivní bezpečnosti nejen pasažérů, ale chodců. Je proto nutné najít kompromis mezi líbivým tvarem karoserie a splněním přísných testů pasivní ochrany. K dosažení těchto cílů se používají nově vyvíjené materiály a technologie. K usnadnění a urychlení vývoje konstrukčních prvků automobilů, zvýšení kvality a snížení nákladů pomohl rozvoj počítačových nebo chcete-li numerických simulací. Můžeme do nich zahrnout výpočet statistických a dynamických dějů využívajících metodu konečných prvků (FEM). Simulace se využívá např. ke snížení hlučnosti automobilu, tepelných výpočtů součástí, simulacích proudění (aerodynamiky), při crash testech, zvyšování tuhosti karoserie, analýze napětí a deformací, kterým se věnuje i tato diplomová práce. Nevýhodou těchto simulací je objem dat, kdy v některých případech trvá zpracování výpočtů i několik dní. I přesto si v dnešní době nelze představit vývoj automobilu bez přítomnosti počítačové simulace a v budoucnu se dá očekávat její velký rozvoj.

Cílem práce je zjistit chování materiálu za mezí pevnosti využitím numerické simulace, v porovnání s reálnými výsledky deformací získaných ze systému ARAMIS.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže 2822 ze strany TUL v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

## 2 Teoretická část

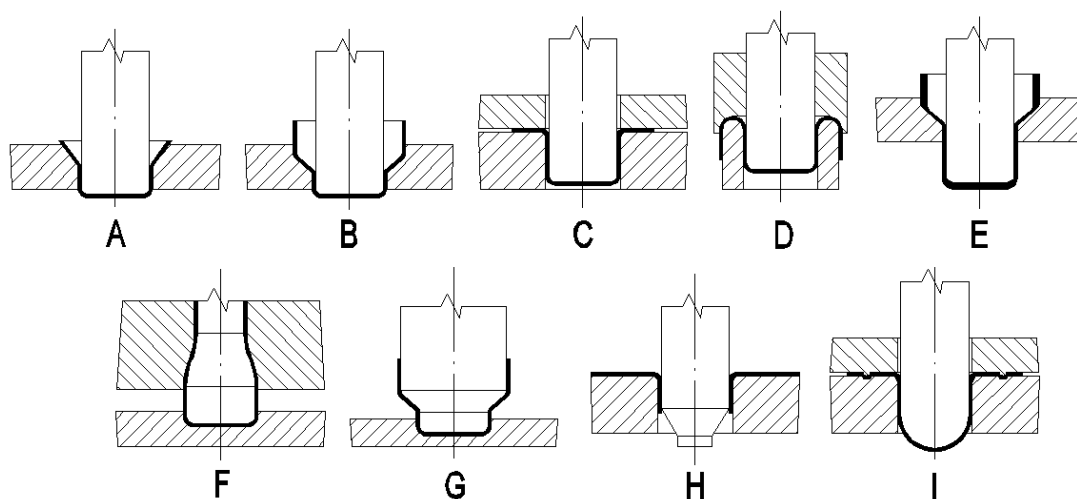
### 2.1 Technologie tváření kovů

Technologie tváření kovů je technologický proces, při kterém se žádaného tvaru dosahuje bez odběru třísek. Požadovaného tvar výrobku nebo polotovaru je dosaženo působením vnějších sil a vyvoláním plastické deformace, ke které dojde na mezi kluzu daného materiálu. Proces je doprovázen fyzikálními změnami a změnami struktury materiálu, jež mají za následek ovlivnění mechanických vlastností materiálu.

Výhodou technologie tváření je vysoká produktivita a hospodárnost. Při výrobě vzniká minimum odpadu, výrobky mají dobrou rozměrovou a tvarovou přesnost. Nevýhoda je ve vysoké ceně strojů a nástrojů.

### 2.2 Technologie plošného tváření – tažení

Tažením plechů a pásů vzniká prostorový výlisek nerozvinutého tvaru. Výlisek se zhotovuje v jedné nebo ve více operacích v závislosti na složitosti výlisku. Dle tvaru výlisku se proces tažení dělí na mělké a hluboké, tažení se ztenčením a bez ztenčení stěny, tažení rotačních a nerotačních tvarů a tažení nepravidelných tvarů (tzv. karosářské výlisky). Výchozím polotovarem je přístřih plechu, pás plechu nebo jinak zpracovaný polotovar, který lze zpracovávat technologiemi na obrázku 2.2.1. [1]



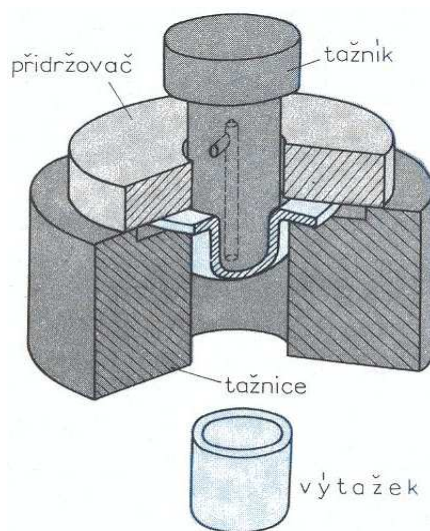
**Obr. 2.2.1:** Technologické způsoby tažení

*A, B - tažení bez přidržovače, 1. a 2. Tah; C – tažení s přidržovačem, 1. a 2. Tah; D – zpětné tažení (obracení); E – tažení se ztenčením stěny; F – zužování; G – rozšiřování; H – lemování (přetahování); I – napínání*

### 2.2.1 Princip tažení plechu

Princip spočívá v působení tažníku zatíženého silou  $F$  na tvářený polotovár, který je tažen přes tažnou hranu, která se při procesu nejrychleji opotřebovává, do otvoru tažnice. Čelní hrany na tažníku a hrany protahovacího otvoru na tažnici jsou zaobleny, aby nedocházelo k porušení (prostřížení) materiálu. Síla k tažení se kontroluje z podmínky pevnosti materiálu při uvažování tření a zpevnění materiálu, aby při tažení nedošlo k porušení soudržnosti materiálu.

Hluboké tažení patří mezi nejnáročnější operace plošného tváření. V části pod přidržovačem dochází k plastické deformaci a deformace na čele tažníku je zanedbatelná. Při hlubokém tažení působí na materiál tlakové napětí vyvolané přidržovačem, který zabraňuje zvlnění plechu. Důležité vlastnosti materiálu, které mají vliv na průběh hlubokého tažení, jsou koeficient zpevnění  $n$  a anizotropie  $r$ . Dalšími důležitými faktory jsou tření a mazání na povrchu tažníku, tažnice a výtažku.



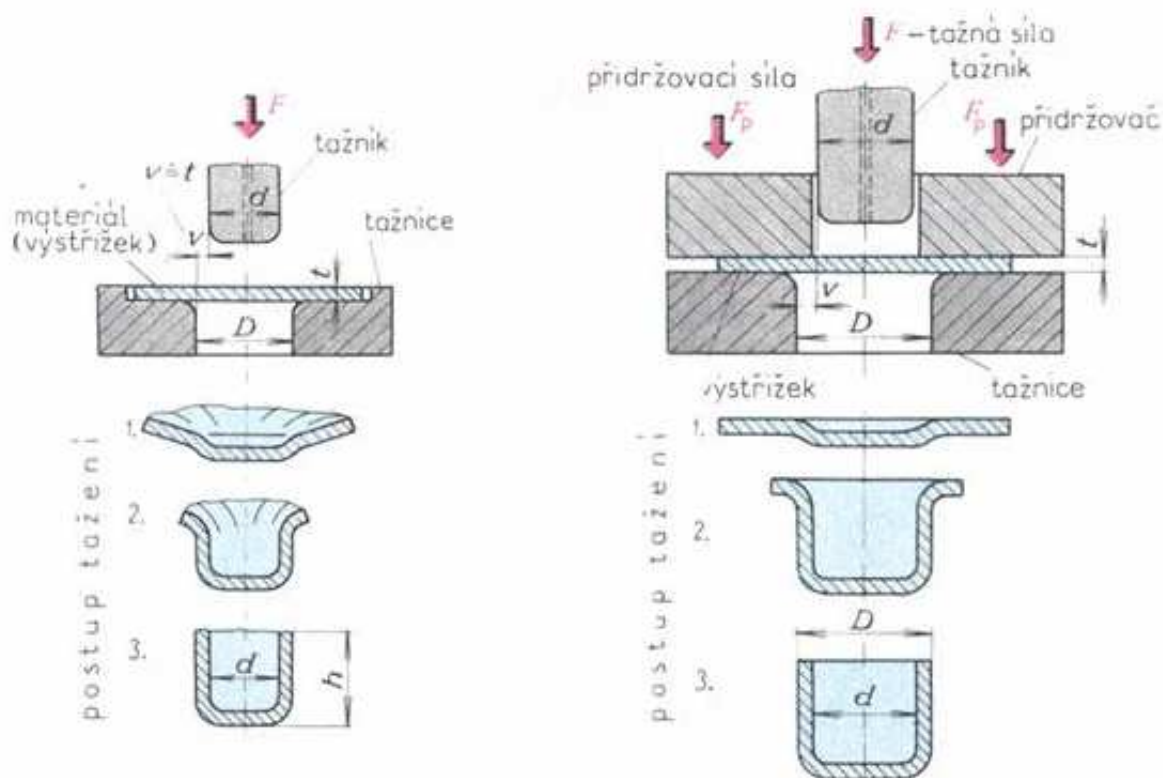
Obr. 2.2.2: Princip tažení plechu [1]

### 2.2.2 Vznik vln při tažení

Vznik vln je jednou z nejčastějších vad u tažení. Důsledkem vln může být poškození tažnice, nepříznivý vliv na další části sestavy a jejich funkci. Zejména při hlubokém tažení dochází k velkému přesunu objemu materiálu do tažnice. Ze zákona zachování objemu se materiál při tažení vytlačuje, zvětšuje výšku a mění svou tloušťku. Materiál postupuje z příruby do válcové

části tažnice a v místě příruby při vysokém stupni deformace dochází k vlnění materiálu. Při nízkém stupni deformace a velké tloušťce se vlny na materiálu netvoří, protože jsou nízké a vyhlazují se otvorem tažnice.

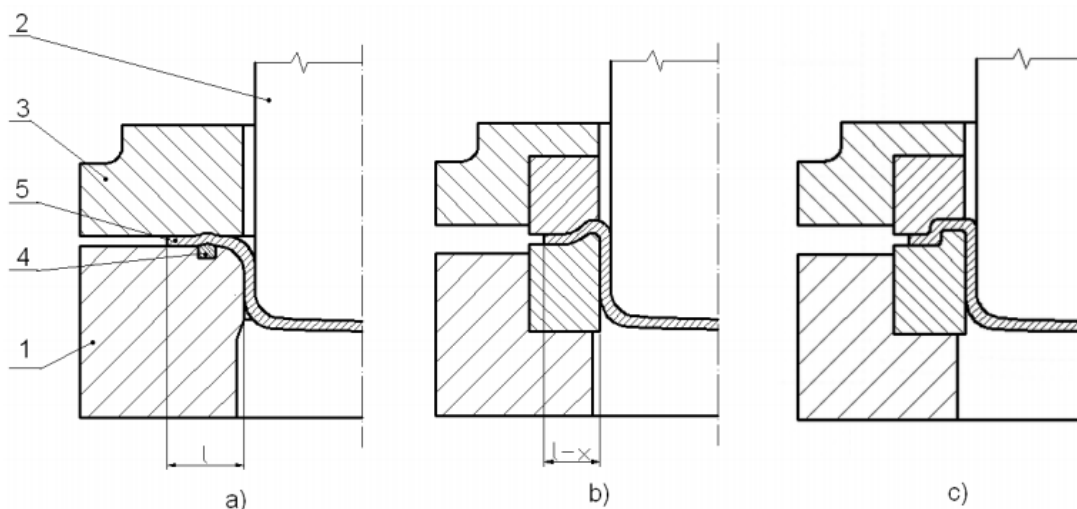
Vzniku vln lze zabránit použitím přidržovače při tažení, což má za následek pěchování materiálu pod přidržovačem a zvětšování tloušťky. Při použití přidržovače musíme znát měrný tlak přidržovače  $p$ , který závisí na tloušťce plechu, součiniteli tažení, jakosti plechu a poměru výchozí tloušťky plechu vzhledem k průměru nádoby.



**Obr. 2.2.3:** Vznik vln u tažení bez přidržovače (vlevo) a s přidržovačem (vpravo) [1]

U nepravidelných, velkých a složitých výlisků jako, jsou např. karoserie automobilů, kde jsou podmínky tváření mnohem složitější ve srovnání s pravidelnými výtažky, se zabráňuje vzniku vln pomocí tzv. brzdících žebër. Ke zlepšení podmínek tváření dochází vlivem zvětšení odporu tvářeného materiálu v přírubě, kdy brzdící žebra zpomalí tok materiálu a usměrní přemísťování tvářeného materiálu v rozích. Žebra se dělají nejčastěji na tažnici ale mohou být i na přidržovači v kombinaci se zaoblenými drážkami na tažnici. Brzdící žebra mohou být zaoblená nebo pravoúhlá. Pravoúhlá

žebra mají menší tahovou napjatost materiálu pod přidržovačem, vyšší brzdící intenzitu, díky čemuž jsou na výtažcích minimální technologické přídatky, malé pružné deformace a vyšší jakost povrchu. [2]



**Obr. 2.2.4:** Schémata nástrojů opatřených brzdícími žebry [2]

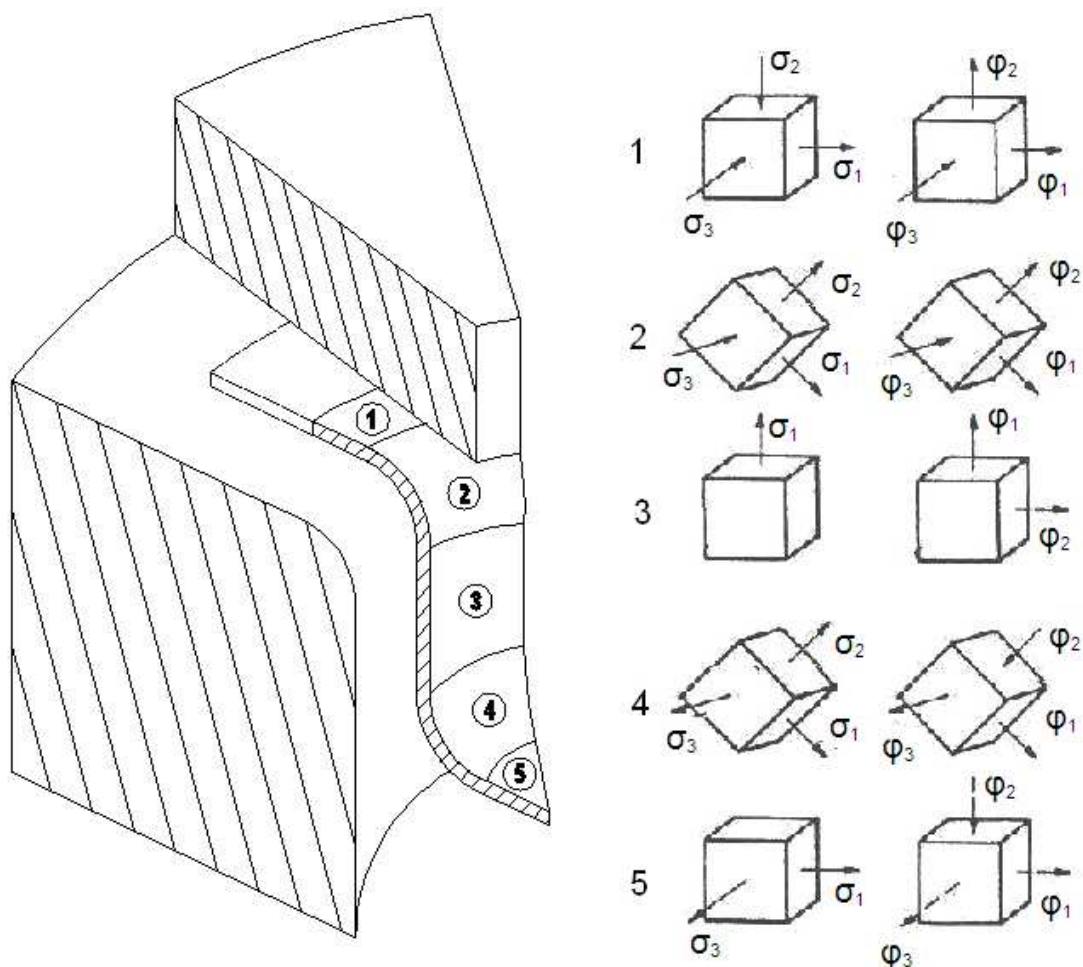
a), b) – zaoblená brzdící žebra, c) – pravoúhlé brzdící žebro

1 – tažnice, 2 – tažník, 3 – přidržovač, 4 – brzdící žebro, 5 – výtažek

### 2.2.3 Napětí a deformace při tažení

Při tažení je napjatost v tvářeném tělese v jednotlivých místech a fázích tažení jiná (viz obr. 2.2.5). Vlivem toho dochází k anizotropii mechanických vlastností materiálu. Ve dně (5) vzniká prostorová deformace a rovinná tahová napjatost tvořená tahovým radiálním napětím  $\sigma_1$  a tlakovým tečným napětím  $\sigma_3$ , materiál se vytahuje stejnoměrně do dvou směrů, ale zeslabení dna je při jednooperačním tažení téměř zanedbatelné. Ve válcové části (3) působí jednoosá napjatost tvořená tahovým radiálním napětím  $\sigma_1$ , a proto zde nedochází k rozšiřování ve směru tečném. V místě přechodu válcové části na dno (4) je rozvinuta prostorová napjatost složená z radiálního tahového napětí  $\sigma_1$ , tečného tlakového napětí  $\sigma_3$  a tlakového napětí  $\sigma_2$ . V tomto místě může dojít ke značnému prodloužení a ztenčení stěny polotovaru vlivem působení vysokého tahového napětí, což může mít za následek utržení dna. Na hraně tažnice (2) vzniká deformace způsobená prostorovým ohybem při působení největšího tahového napětí  $\sigma_1$ , malého tečného napětí  $\sigma_3$ . V přírubě polotovaru pod přidržovačem (1) je napjatost

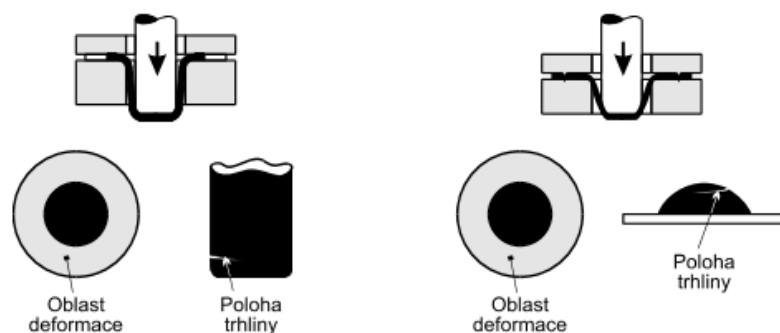
rovinná, tvořena radiálním tahovým napětím  $\sigma_1$ , tečným tlakovým napětím  $\sigma_3$ , kolmo k nim působí tlakové napětí od přidržovače  $\sigma_2$ .



**Obr. 2.2.5:** Schéma napětí a deformace při tažení s přidržovačem

#### 2.2.4 Technologická tvářitelnost při plošném tváření

Plošné tváření je charakterizováno neustálým rovinným stavem napjatosti. Zahrnuje celou škálu technologií, při nichž se skutečný stav napjatosti v jednotlivých stádiích procesu mění od jednoosého tahu přes smyk, ke kombinaci tahu a tlaku a dvojosého tahu. Technologie jsou ohraničeny hlubokým tažením a vypínáním, přičemž většina technologií tažení v sobě kombinuje obě operace v různé míře. [3]



**Obr. 2.2.6:** Základní operace tažení plechů, hluboké tažení – vlevo, vypínání – vpravo [3]

Složitost funkčních závislostí technologické tváritelnosti vede na jedné straně k tomu, že nelze formulovat jednoduchý ukazatel technologické tváritelnosti při lisování plechu, na straně druhé vyjasňuje rozsah používaných ukazatelů. [3]

Technologická tváritelnost při plošném tváření je zjišťována při základních a napodobujících (technologických) zkouškách.

### 2.3 Zkouška tahem – mechanická zkouška plechů

Je základní a nejrozšířenější zkouškou pro stanovení základních mechanických vlastností a popis elastoplastického chování materiálu. Princip zkoušky, význam značek a pojmů je stanoven normou EN ISO 6892 – 1.

Výstupními výsledky ze zkoušky tahem je závislost síly  $F$  [N] na prodloužení zkušebního tělesa  $\Delta l$  [mm]. Z těchto hodnot a známých rozměrů zkušebního tělesa posléze můžeme vypočítat smluvní napětí  $R$  [MPa] dané vztahem:

$$R = \frac{F}{S_0}, \quad (1)$$

kde  $F$  [N] je zatěžující síla a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je původní plocha průřezu. Zvyšování napětí ve vzorku má za následek prodlužování zkušebního vzorku, které je definováno poměrným prodloužením (deformací)  $\varepsilon$  [-]:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

kde  $l$  [mm] je okamžitá délka měřené části vzorku a  $l_0$  [mm] je počáteční délka zkušební vzorku. Po dosažení určité hodnoty napětí se materiál začne trvale deformovat. Tato hodnota se nazývá mez kluzu  $R_p$  [MPa]. U materiálů bez výrazné meze kluzu (např. hlubokotažné materiály) se zavádí pojem smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  [MPa], což je napětí odpovídající trvalé deformaci 0,2% a vypočítané podle vztahu:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}, \quad (3)$$

kde  $F_{p0,2}$  [N] je síla, která způsobí trvalou deformaci 0,2% a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční průřez zkušební vzorku. Další veličinou, kterou můžeme vypočítat je smluvní mez pevnosti  $R_m$  [MPa]:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0}, \quad (4)$$

kde  $F_{\max}$  [N] je maximální dosažená síla při zkoušce tahem a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční průřez zkušební vzorku. V materiálu probíhají procesy, které vedou ke konečné fázi tahové zkoušky, k lomu. Po přetržení vzorku lze stanovit tažnost  $A_x$  [%], jejíž hodnota slouží k posouzení houževnatosti a tvárnosti materiálu a která je dána vztahem:

$$A_x = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l_u}{l_0} \cdot 100, \quad (5)$$

kde  $\Delta l_u$  [mm] je rozdíl mezi délkou zkušební vzorku po přetržení  $l_u$  [mm] a počáteční délkou tyče  $l_0$  [mm]. Za index  $x$  u tažnosti  $A$  se dosazuje délka zkušební vzorku před zkouškou. Násobení hodnotou 100 slouží k převodu výsledku na procenta. Dále můžeme stanovit kontrakci  $Z$  [%] danou vztahem:

$$Z = \frac{S_0 \cdot S_u}{S_0} \cdot 100, \quad (6)$$

kde  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční průřez zkušební vzorku,  $S_u$  [mm<sup>2</sup>] označuje průřez zkušební vzorku po přetržení a násobení hodnotou 100 dojde k převodu na procenta.

Prozatím byl uveden výpočet smluvních hodnot, ale je třeba vypočítat i hodnoty skutečného napětí  $\sigma$  a skutečné deformace  $\varphi$ .

Skutečné napětí vypočteme obdobně jako smluvní jen s tím rozdílem, že sílu  $F$  [N] vztáhneme k okamžitému průřezu  $S$  [mm<sup>2</sup>], pak tedy:



$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (7)$$

K odvození vzorce pro skutečné napětí musíme upravit již uvedený vzorec pro poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \Rightarrow \frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon, \quad (8)$$

ze zákona zachování objemu platí:

$$l_0 \cdot S_0 = l \cdot S, \quad (9)$$

po úpravě vztahů smluvního a skutečného napětí:

$$\sigma \cdot S = R \cdot S_0, \quad (10)$$

nyní můžeme odvodit vztah pro skutečné napětí  $\sigma$  [MPa]:

$$\sigma = R \cdot \frac{S_0}{S} = R \cdot \frac{l}{l_0} = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad (11)$$

Skutečná deformace je stanovena diferenciálem míry skutečné deformace:

$$d\varphi = \frac{dl}{l}, \quad (12)$$

následnou integrací v mezích délek  $l$  a  $l_0$  a úpravou nám vznikne tvar:

$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}, \quad (13)$$

a po aplikaci vzorce pro poměr délek je poté skutečná deformace  $\varphi$  [-]:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (14)$$

Závislost intenzity skutečných napětí  $\sigma_i$  na intenzitě skutečných deformací  $\varphi_i$  se nejčastěji aproximuje dle vztahu:

$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n, \quad (15)$$

kde  $C$  [MPa] je konstanta monotónního zpevnění, která představuje napětí odpovídající přetvoření  $\varphi = 1$  a  $n$  [-] je koeficient deformačního zpevnění, jehož výpočet je dán normou EN 10130:1998 v rozmezí  $\varepsilon = 5\% \div 10\%$  pro materiály s malou tvářitelností a  $\varepsilon = 10\% \div 20\%$  pro materiály s velkou tvářitelností. Nebo normou ČSN ISO 102 75 v intervalu  $\varepsilon = 5\%$  až do maximální rovnoměrné deformace.

## 2.4 Anizotropie

Anizotropií se rozumí nesejnost vlastností materiálu v různých směrech souřadného systému. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní, charakterizovaný třemi ortogonálními osami anizotropie, za materiál ortogonálně anizotropní (ortotropní).

Osa  $x$  se ztotožňuje se směrem válcování, který se označuje jako směr 0. Při posuzování anizotropie plechů se rozlišuje anizotropie plošná (v rovině plechu) a normálová (ve směru tloušťky plechu). [4]

Normálová anizotropie se kvantitativně určuje bezrozměrným směrovým součinitelem plastické anizotropie:

$$r_{\alpha} = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{l_k \cdot b_k}{l_0 \cdot b_0}} \quad (16)$$

kde:  $r_{\alpha}$  – směrová hodnota  $r$  [-]

$b_0$  – počáteční šířka vzorku [mm]

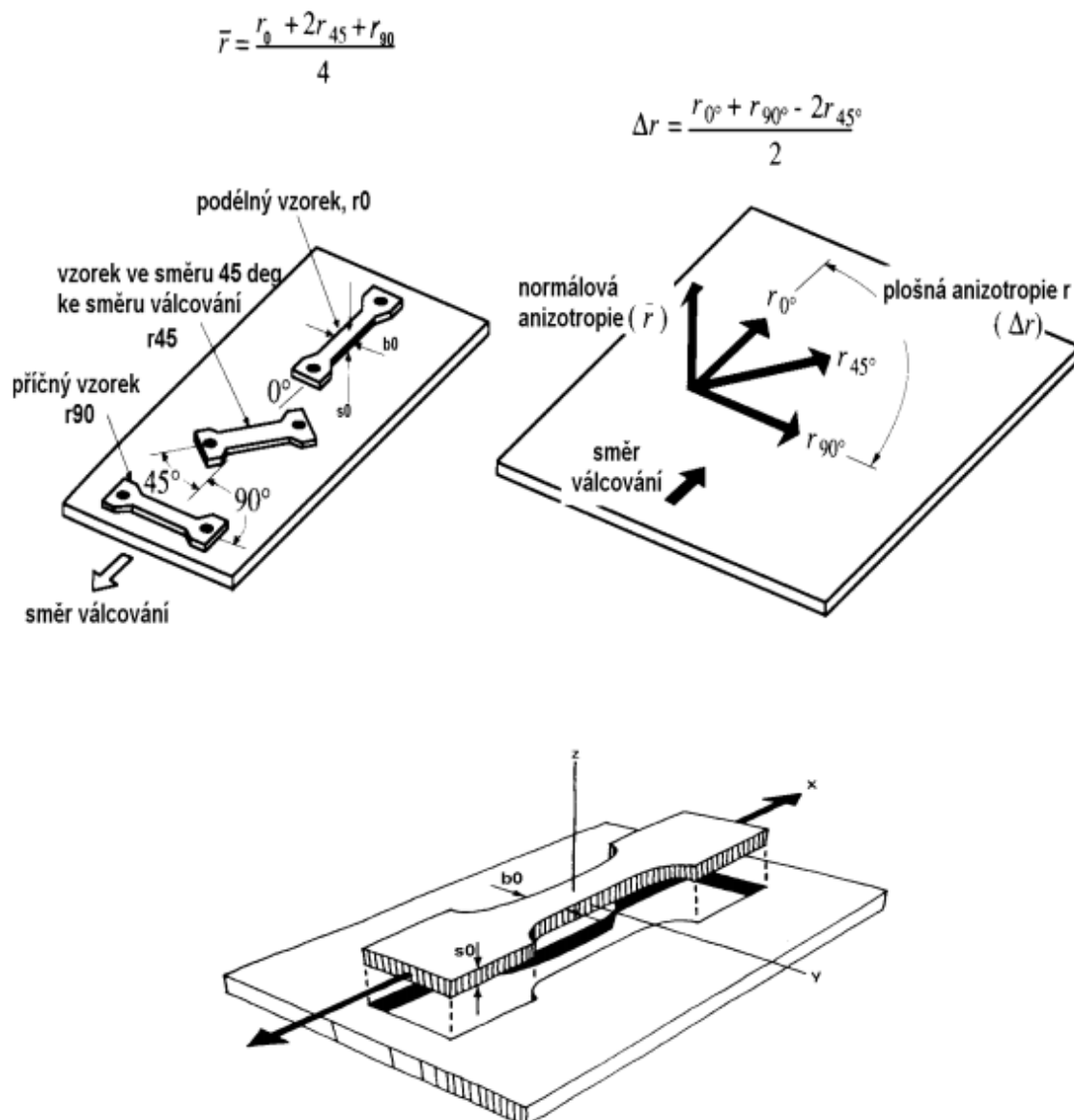
$b_k$  – konečná šířka vzorku [mm]

$s_0$  – počáteční tloušťka vzorku [mm]

$s_k$  – konečná tloušťka vzorku [mm]

$l_0$  – počáteční délka vzorku [mm]

$l_k$  – konečná délka vzorku [mm]



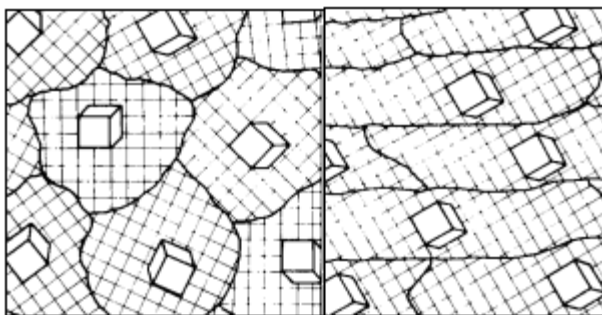
**Obr. 2.4.1:** Základní pojmy k definici anizotropie [4]

Anizotropní jsou, (díky rozdílné vzdálenosti atomů v různých krystalografických rovinách a směrech a z toho vyplývajících rozdílných vazebných mezi atomárních sil), už monokrystaly kovů. Z technického hlediska je předmětem zájmu zejména anizotropie mechanických a jmenovitě plastických vlastností polykrystalických kovových materiálů. Rozhodující vliv na anizotropii má textura, která je definovaná jako pravidelné geometrické a krystalografické uspořádání struktury a substruktury polykrystalického kovu.[4]

Textura je výsledkem tváření (napětového a deformačního stavu odpovídajících způsobu tváření) a tepelného tváření. Textura vzniklá tvářením se nazývá deformační textura. Rozlišujeme deformační texturu strukturní (mechanickou) a krystalografickou.

Strukturní textura je způsobena především nehomogenitou chemického složení a přítomností vměstků v litém polotovaru. Během tváření dochází k orientaci a redistribuci vměstků. Tvárné vměstky se zploští a protahují, spolu s netvárnými vměstky se rozloží ve směru válcování nebo tažení. Vzniká tzv. vláknitá nebo řádkovitá textura.[4] Vláknitá textura se nedá tepelným zpracováním odstranit. Řádkovitá textura vzniká i uspořádáním strukturních fází při tváření ocelí s vícefázovou strukturou, odstraňuje se normalizačním žíháním a odstraňuje se vždy.

Krystalografická textura vzniká při tváření nebo tepelném zpracování, uspořádáním původně náhodně orientovaných jednotlivých zrn do jisté přednostní orientace. Podílí se významněji na anizotropii vlastností, probíhali do válcování za nízkých teplot, kdy nedochází k úplné rekrytalizaci základní deformované struktury.



**Obr. 2.4.2:** Schéma vzniku deformační krystalografické textury [4]

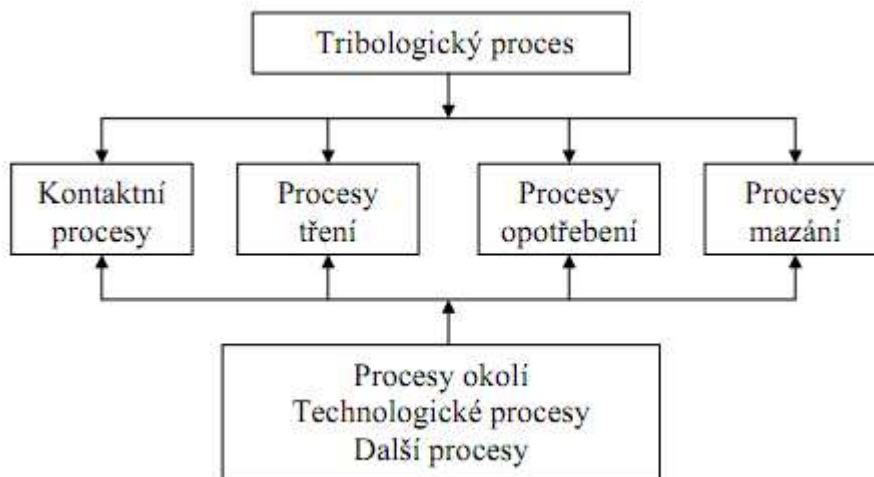
Krystalografická anizotropie, zejména u kovů s kubickou mřížkou, má významný vliv na počátek závislosti *napětí – deformace* (na vlastnosti materiálu charakterizující plastickou deformaci jako je mez kluzu a mez pevnosti). [4]

Vliv strukturní anizotropie je významný zejména v závěrečném úseku závislosti *napětí – deformace*. Projevuje se u vlastností související zejména s porušením materiálu (poměrné zúžení, skutečné napětí při porušení). [4]

## 2.5 Tribologie a mazání

Tribologie je vědní obor, zabývající se chováním dotýkajících se povrchů při vzájemném pohybu nebo pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být obecně kluzný, valivý, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se uplatňují dva i více druhů pohybů současně.

Tribologický proces charakterizují materiální interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase. [5]



**Obr. 2.5.1:** Vzájemné vazby v tribologickém systému [5]

Při vzájemném působení dvou různých těles dochází k odporu proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v místě dotyku jejich povrchů. Tomuto procesu říkáme tření, při kterém dochází ke ztrátě mechanické energie. Důsledkem tření je opotřebení, které vede k úbytku materiálu.

Tření se dělí na vnitřní (v objemu tělesa, kapaliny, tuhé látky) a vnější (na rozhraní fází) a dle druhu relativního pohybu na smykové a valivé.

Opotřebení se dělí na:

- adhezivní (smýkání dvou tuhých těles přitlačovaných k sobě normálovou silou),
- abrazivní (styk dvou povrchů, přičemž jeden povrch je tvrdší nebo jsou mezi oběma povrchy přítomny volné tvrdé částice),
- erozivní (dopad tvrdých částic na měkký povrch a vznik nerovností),

- kavitační (oddělování částic z povrchu v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině),
- únavové (šíření podpovrchových trhlin vznikající z cyklického namáhání povrchu, následkem je vydrolování materiálu),
- vibrační (oddělování částic materiálu v místech kmitavých posuvů funkčních ploch),
- korozní (opotřebení vlivem chemických reakcí na povrchu materiálu)

Mazání zvyšuje životnost nástrojů, výrazně snižuje tření a opotřebení třecích povrchů prostřednictvím maziva. Mazivem může být látka v plynném, kapalném nebo pevném skupenství. Primární úlohou maziva je ochrana třecích povrchů, sekundární úlohou je odvod tepla, odvod nečistot z třecích ploch, ochrana povrchu před korozí, těsnící činitel ke snížení ztrát energie.

Požadavky na vlastnosti maziv:

- vytváření dostatečně pevného a nevysychajícího filmu s vhodným koeficientem tření
- po použití lehce odstranitelné a fyziologicky nezávadné
- tepelně stálé
- nekorozivní a chemicky nereaktivní s povrchem výtažku
- nesmí vyvolávat barevné změny na povrchu výtažku
- kapalná maziva musí mít dobrou smáčivost kovů a dobrou tepelnou vodivost

Maziva se dělí do tří skupin:

- kapalná – ropné, syntetické a rostlinné oleje bez i s přísadami, přídavky tuhých maziv, emulzí, vodních roztoků sodných a draselných mýdel (intenzivní chlazení)
- plastická – měkká tažná maziva s požadavkem velké mazací schopnosti
- tuhá – požadavkem velmi únosný mazací film, bez zvláštních nároků na odvod tepla

Jednou z nejdůležitějších vlastností tekutých maziv je viskozita, která vyjadřuje velikost vnitřního tření molekul a projevuje se odporem proti pohybu

jeho částic. Vyšší viskozita znamená větší tření ale i větší únosnost mazaného kontaktu. Vlastnosti viskozity jsou závislé na teplotě a na tlaku. Viskozita klesá se vzrůstající teplotou a stoupá se vzrůstajícím tlakem.

Podle základního tribologického systému mohou nastat čtyři základní stavy tření:

Suché tření – nastává v okamžiku, kdy mezi povrchy není mazivo, má dva aspekty: deformační (dochází k plastické deformaci),

adhezní (uplatnění chemických procesů),

- na oba aspekty mají vliv vlastnosti obou povrchů (velikost, tepelné vlastnosti, mechanické vlastnosti, chemické složení),
- při zhotovování výlisků je nežádoucí

Mezné tření – mezi povrchy je vrstva maziva v řádech několika atomů ( $1 \div 10 \text{ nm}$ )

- povrchy jsou v bezprostřední blízkosti, takže dochází v jejich vzájemné interakci
- v praxi mezné tření vzniká při malých smykových rychlostech a mezi drsnými povrchy

Smíšené tření – mazací film plně neodděluje třecí povrchy, dochází k jejich vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi

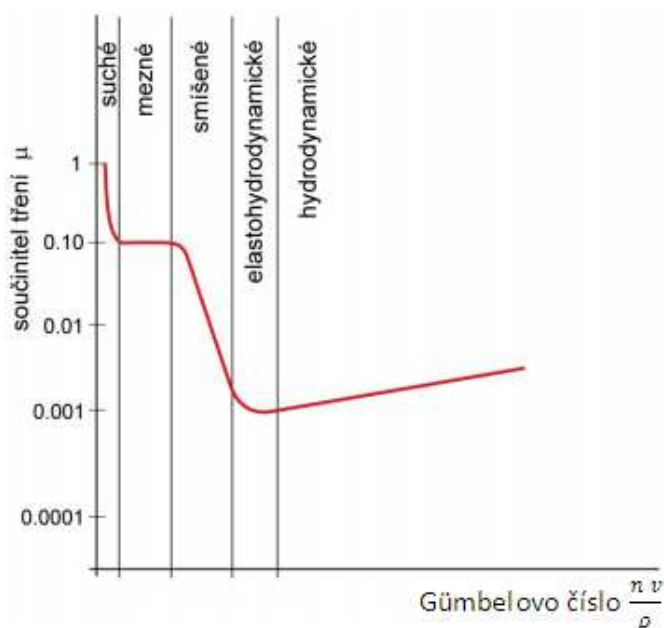
- povrchové nerovnosti se deformují, v jejich styku nastává mezné mazání, v jiných oblastech kontaktu je mazání kapalinové
- ke smíšenému mazání dochází při malých rychlostech třecích povrchů, změnách směru jejich pohybu nebo při jejich velkém zatížení
- tloušťka mazacího filmu je  $0,01 \div 1 \text{ } \mu\text{m}$
- nejrozšířenější forma tření při tváření

Kapalinové tření – dokonalé oddělení třecích povrchů souvislou vrstvou

maziva, která zcela vyrovnává drsnost povrchů

- třecí síla závislá pouze na velikosti vnitřního tření v mazací vrstvě

Základní režimy mazání jsou zobrazeny ve Stribeckově diagramu, který vyjadřuje závislost součinitele tření  $\mu$  na Gümbelově čísle (součin dynamické viskozity maziva  $\eta$  a rychlosti tváření  $v$ , dělen kontaktním tlakem  $p$ )

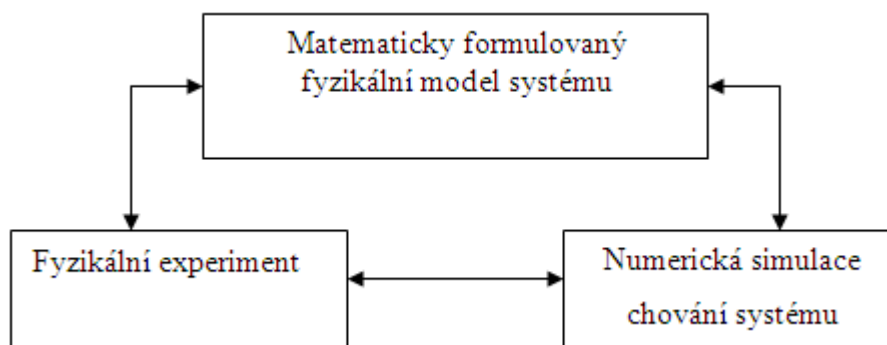


**Obr. 2.5.2:** Stribeckův diagram [5]

## 2.6 Fyzikální a numerické modelování plošného tváření

Fyzikální jevy jsou obecně velmi složité, a proto se pro jejich analýzu volí určité, zpravidla zjednodušující, předpoklady. Zvolené předpoklady jsou buď vypočítány z experimentu, nebo plynou z obecně přijímaných teorií. Při analýze výsledků pak nesmíme zapomínat na oblast platnosti vytvořené teorie. V praxi nastává mnoho chyb plynoucích z použití teorie, aniž by byla splněna oprávněnost pro možnost jejího použití. Nezastupitelnou úlohu při fyzikálním a matematickém modelování hraje experiment. Možné schéma interakcí při modelování je na obr. 2.6.1. Z experimentu plynou některé zákonitosti a předpoklady, které je zpravidla možné použít jako zpětnou vazbu na teorii, popř. je použít při numerické simulaci. [6]





**Obr. 2.6.1:** Souvislosti fyzikálního a matematického modelování s fyzikálním experimentem [6]

Procesy plošného tváření jsou z pohledu termodynamiky procesy nevratné, dissipativní, nestacionární a nelineární. V průběhu tváření dochází k interakci deformačního, napětového a teplotního pole. V dalším výkladu se bude předpokládat, že vliv tepelných efektů je zanedbatelný na pole napětí a deformací při tváření za studena. Plošné tváření je specifické svým schématem napjatosti, které lze s dostatečnou přesností považovat za rovinnou napjatost. Plošné tváření řadíme mezi nelineární fyzikální procesy. Nelinearita se u plošného tváření projevuje takto:

- velké posuvy a natočení bodů zkoumaného tělesa
- velké deformace
- nelineární elastoplastické chování tělesa (vliv deformačního zpevnění)
- směrová závislost mechanických vlastností (anizotropie materiálu)
- u velkých deformací lokální plastické deformace s nukleací porušení a s následným tvárným lomem
- problematika kontaktu s anizotropním třením
- při velkých rychlostech tváření nelze zanedbat vliv setrvačných a gyroskopických účinků

Tyto vlivy je třeba brát v úvahu při sestavování fyzikálního a matematického modelu pro potřeby plošného tváření.

Při fenomenologickém pohledu na přetváření těles, tedy bez zkoumání struktury a jejího vlivu na chování tělesa, se využívá poznatků mechaniky kontinua. Mechanika kontinua pohlíží na těleso jako na spojité prostředí. V mechanice poddajných těles se používá Lagrangeův popis kontinua, sleduje se pohyb částice kontinua  $X$  v čase  $t$ , tj.  $x = x(X, t)$ . [6]

### 2.6.1 Míry deformace tělesa

Změnu velikosti a tvaru tělesa označujeme jako deformaci tělesa a zjišťujeme ji pomocí posuvů jednotlivých částic tělesa. Posunutí je míra vyjádřená v jednotkách délky. Tato veličina však neříká sama o sobě nic o tom, zda jsou posuvy malé nebo velké. Pro získání představy o velikosti deformace se získají bezrozměrné veličiny, které se nazývají přetvoření, deformace.

Při definici měr přetvoření se musí vycházet z požadavků, aby míry přetvoření nebyly závislé na volbě souřadného systému a nebyly ovlivněny pohybem tělesa jako tuhého celku, tj. byly objektivní. Jedna z možností jak definovat míru přetvoření je založena na porovnání rozdílu infinitesimálních vzdáleností dvou částic v aktuální konfiguraci a v konfiguraci referenční. [6]

### 2.6.2 Míry napjatosti

Na těleso působí síly, které se podle způsobu působení rozdělují na vnější a vnitřní. Vnější síly lze rozdělit na síly objemové a povrchové. Vnitřní síly zajišťují soudržnost tělesa.

Objemové síly jsou charakterizovány intenzitou objemových sil. Celkový silový účinek objemových sil je síla a moment. Příkladem objemových sil jsou síly gravitační a síly setrvačné.

Povrchové síly jsou charakterizovány silou působící na infinitesimální povrch tělesa a jsou charakterizovány intenzitou povrchových sil. Celkový silový účinek povrchových sil je síla a moment.

### 2.6.3 Základy metody konečných prvků

Problematika metody konečných prvků jako přibližné numerické metody řešení parciálních diferenciálních rovnic je značně komplikovaná. Diskretizace metodou konečných prvků se provádí pokrytím oblasti jednoduchými geometrickými útvary, kterým se říká konečné prvky. Pokrytí se realizuje tak, aby nevznikly žádné umělé dutiny, a prvky jsou spojovány jen několika hraničními body – uzly. Hlavní myšlenka metody konečných prvků je založena na aproximaci veličiny  $\phi$  pomocí funkčních hodnot veličiny v uzlech  $\phi$ .

Aproximace se realizuje jako lineární kombinace tvarových funkcí

$$\phi = \mathbf{N} \cdot \phi, \quad (17)$$

Tato spojitá oblast s nekonečným počtem částic kontinua se nahradí diskrétním prostředím s nekonečným počtem stupňů volnosti, hovoříme o tzv. diskretizaci oblasti. V mechanice poddajných těles se při řešení deformační variantou metody konečných prvků aproximuje dle posuvu  $u$

$$u = \mathbf{N} \cdot \mathbf{q}, \quad (18)$$

kde  $q$  jsou zobecněné posuvy, a  $N$  je matice tvarových funkcí, která je funkcí prostorových souřadnic. Za předpokladu, že matice tvarových funkcí není funkcí času, je aproximováno pole rychlosti a zrychlení

$$\dot{u} = \mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{q}} \quad (19)$$

$$\ddot{u} = \mathbf{N} \cdot \ddot{\mathbf{q}} \quad (20)$$

Tenzor infinitesimální deformace reprezentován vektorem

$$\underline{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \text{ se určí z}$$

$$\underline{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{q} \quad (21)$$

$$\text{Napjatost je charakterizována vektorem } \underline{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T$$

Mírou napětí je zvolen tenzor skutečných napětí  $\sigma$  a mírou přetvoření je zvolen tenzor infinitesimálního přetvoření  $\varepsilon$ .

Překročí-li napětí určitou hodnotu, pak po odlehčení zůstanou v materiálu trvalé plastické deformace. Po odlehčení vymizí pouze vratné elastické deformace, které se řídí Hookovým zákonem. Dále se předpokládá explicitní nezávislost deformací na čase a rychlosti zatěžování. Z principu

vzniku plastických deformací u kovových materiálů nejsou tyto deformace závislé na středním napětí  $\sigma_H$

$$\sigma_H = \frac{1}{3} \sigma_{ii} . \quad (22)$$

Rozhodující vliv na rozvoj plastické deformace má deviátor napětí.

U reálných materiálů dochází ke zpevnění, tj. k další deformaci je zapotřebí zvýšit napětí. Pro popis deformačního zpevnění se využívají různé matematické modely deformačního zpevnění. Základními modely jsou modely izotropního zpevnění, kinematičtějšího zpevnění a jejich vzájemná kombinace. Model izotropního zpevnění je reprezentován rozpínáním plochy plasticity a mění se tedy okamžitá mez kluzu.

#### 2.6.4 Popis deformace skořepiny – Mindlinova hypotéza

Při plošném tváření můžeme z výpočtového hlediska plech považovat za skořepinu. Skořepina je prvek plošného charakteru, jehož jeden rozměr je podstatně menší než zbývající dva. Střední plocha je geometrickým místem bodů, půlící tloušťku skořepiny. Tvarově složitě výlisky s malými poloměry zaoblení  $r_{min}$ , které jsou srovnatelné s tloušťkou  $h$ , tj. platí  $h/r_{min} \cong 1$ , se považují za tlustostěnné skořepiny. U těchto skořepin nelze zanedbat normálové napětí kolmé ke střední ploše skořepiny, ani nelze zanedbat zprohýbání normál ke střední ploše v důsledku smykových napětí, tj. neplatí Kirchhoffova hypotéza, což má za následek nelineární rozložení napětí po tloušťce materiálu. Důsledkem těchto skutečností jsou velmi komplikované výpočtové vztahy. [6]

Pro možnost řešení složitých úloh tlustostěnných skořepin se zavádějí zjednodušení. Zavádí se předpoklad o chování normál, tzv. Mindlinova hypotéza – normály ke střednici zůstávají i po deformaci kolmé, ale nemusí být kolmé k zdeformované střednici. Z tohoto předpokladu plyne konstantní průběh zkosu po tloušťce materiálu. Dalším zjednodušením je předpoklad o napjatosti, kde se předpokládá rovinná napjatost v rovině skořepiny.

## **2.7 3D optické měření deformace při tváření materiálu**

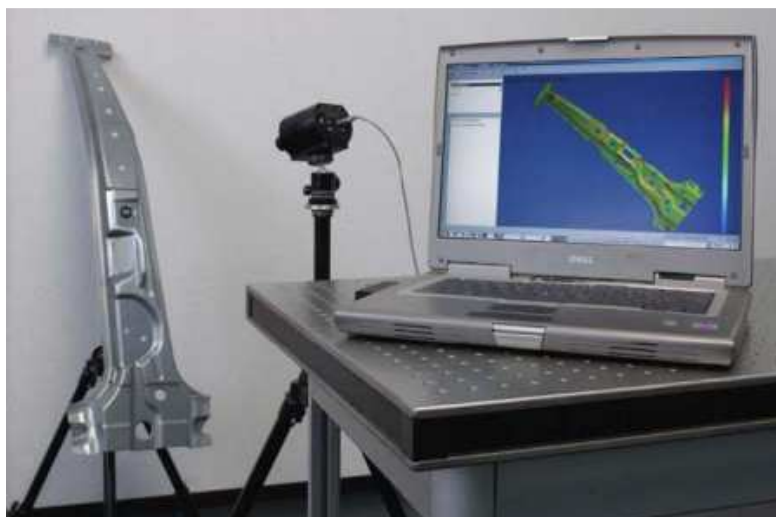
Technologie optického 3D měření deformace se stále častěji prosazují do praxe. Bezkontaktní optické metody měření jsou významným pomocníkem v aplikacích, kde je nutno měřit velmi horké nebo nedostupné povrchy, případně tenké součásti u kterých by připojení měřicích senzorů vedlo k ovlivnění chování součásti atp. Optické měření lze provádět jak na rovinných plochách, tak na i na komplikovaných 3D součástech.

### **2.7.1 Analýza pomocí optického systému ARGUS**

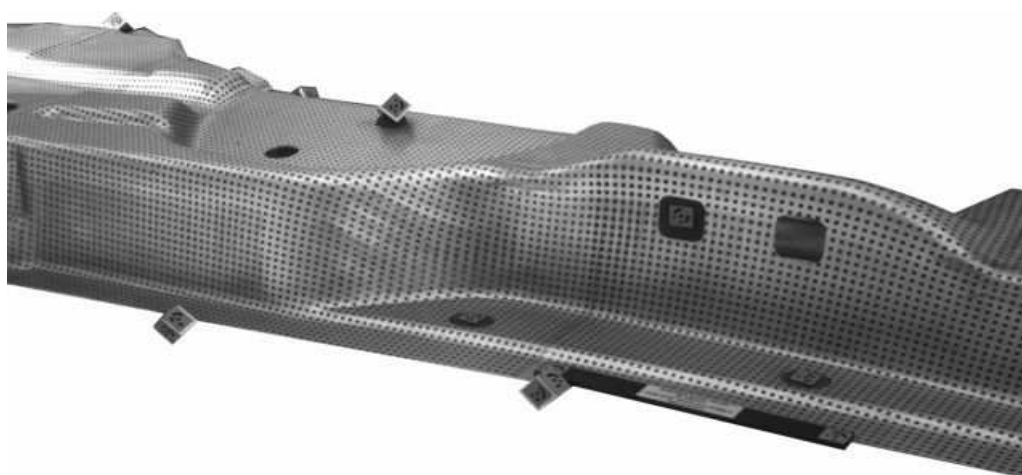
Argus je bezkontaktní měřicí systém pro měření reálných 3D deformací plechu při lisovacím procesu. Původně byl vyvinut pro automobilku RENAULT, nyní je používán ve všech lisovnách této automobilky a většiny jejich dodavatelů a výzkumných institucí po celém světě. Systém využívá jedné kamery a prostorový obraz je skládán z více snímků pořízených z různých stran. Systém analyzuje počátečný a konečný stav. [7]

Postup měření:

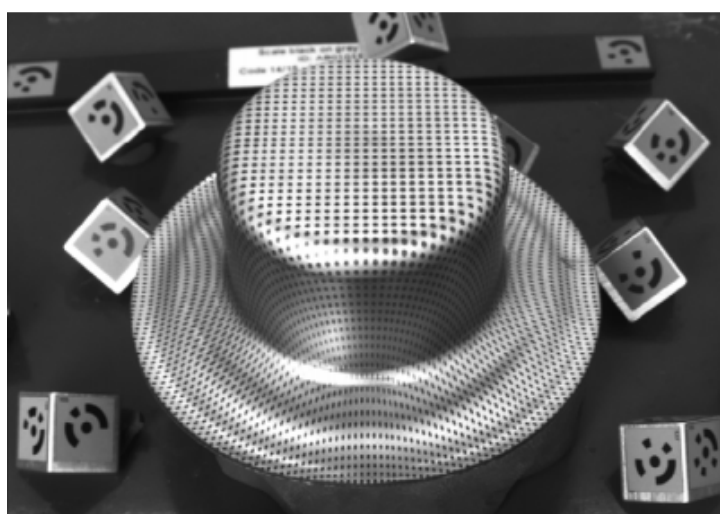
Na měřený objekt je vyleptán elektrochemicky, laserově, případně natištěn rastr (sít') bodů o mikroskopické hloubce, který se deformuje zároveň s vylisováním plechového dílu (obr. 2.7.2). Vzdálenost bodů v síti je standardně mezi 1 a 6 mm. Rastr je po vylisování plechu změřen kamerou s CCD čipem (obr. 2.7.3). Ze snímků jsou pomocí tzv. image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky. Vzdálenost mezi body mřížky definuje posunutí. Ze zákona zachování objemu je vypočteno rozložení hlavní a vedlejší deformace a redukce tloušťky materiálu. Výsledky jsou zobrazeny ve 3D modelu (obr. 2.7.4), řezech a na výstupním protokolu. [8]



**Obr. 2.7.1:** Optický měřicí systém ARGUS [8]



**Obr. 2.7.2:** Ukázka naleptané sítě po lisování [7]



**Obr. 2.7.3:** Tvářená součást s kódovanými značkami připravená k snímání digitální CCD kamerou z různých směrů [8]

#### Přednosti systému:

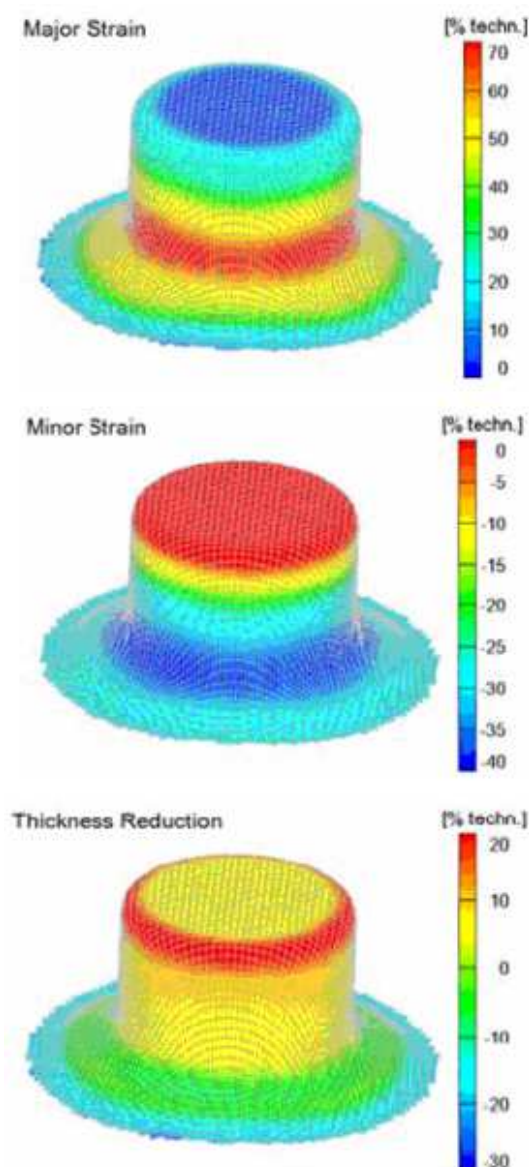
- flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišení systému)
- velký rozsah měření (objekty od velikosti 100mm do několika m)
- rozsah měření deformace (od 0,5% až do několika stovek %)
- vysoká přesnost a hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)
- přehledná analýza výsledků měření (grafická vizualizace)
- mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)

#### Výstupy z měření:

- hodnoty 3D posunutí
- hodnoty 3D deformace
- hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major strain, Minor strain)
- řezy
- změny tloušťky materiálu
- velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC diagram)
- grafické a tabulkové výstupní protokoly

#### Oblasti využití systému ARGUS:

- ověřování a optimalizace simulace tažení plechů
- optimalizace procesu tváření (FLC diagram)
- detekce oblastí s kritickou deformací
- optimalizace lisovacích nástrojů
- zkoušky materiálu



**Obr. 2.7.4:** Zobrazení výsledků numerické simulace na 3D modelu – hlavní deformace (*Major Strain*) a vedlejší deformace (*Minor Strain*) na povrchu výtažku a redukce tloušťky (*Thickness Reduction*) stěny vypočítaná z konstantního objemu. Všechny výsledky jsou počítány z měření rastru na povrchu výtažku. [8]

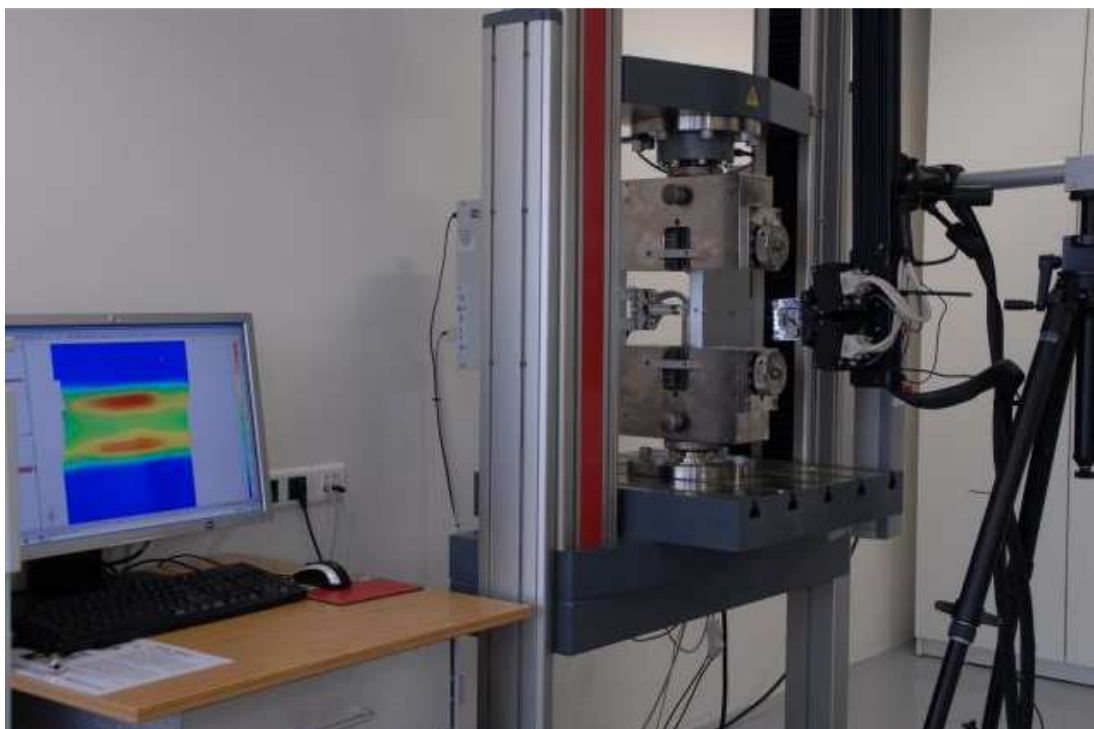


### 2.7.2 Analýza pomocí optického systému ARAMIS

ARAMIS je měřicí bezkontaktní systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací objektu zatěžovaném buď staticky, nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech, nebo může být řízen externím signálem. Maximální rychlost snímání může být až 4000 snímků za vteřinu. Při měření rotačních objektů lze propojit více systémů ARAMIS do jednoho měřicího systému. [7]

Postup měření:

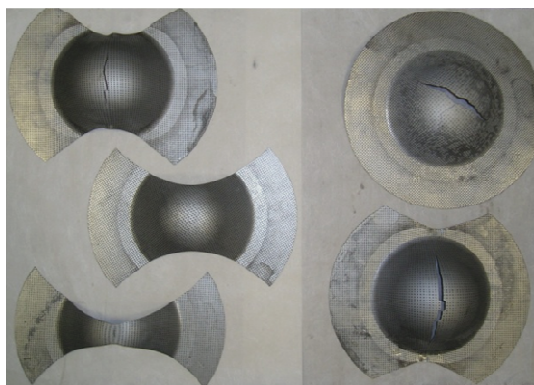
Na měřený objekt je stejně jako u systému ARGUS vyleptán elektrochemicky nebo laserově rastr. Rastr lze také na objekt natisknout. Nejjednodušším vytvořením rastru a zároveň nejpřesnějším způsobem při vyhodnocování měření je nastříkání nepravidelného (náhodného) kontrastního vzoru tzv. patternu (obr. 2.7.6) pomocí spreje, který se deformuje zároveň s tvářeným vzorkem. Vzorek je snímán automaticky, s frekvencí, která je nejvyšší před okamžikem porušení, dvěma kamerami s CCD čipem. Během testu snímá měřicí systém parametry zkoušení (sílu a zdvih) a může tak být řízen testovacím strojem. Ze snímků jsou pomocí tzv. Image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky nebo rastru. Porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy, tvar deformovaného objektu a 3D deformace. Pro analýzu tvářecích postupů se dlouho dobu využívá tzv. limitních křivek tváření FLC. Kombinace těchto křivek v diagramu udává komplexní přehled o mezích materiálu vzhledem k jeho možnostem tváření. K získání potřebných informací k sestavení křivek se používá metoda dle Nakajimy (ISO 12004), která stanovuje několik druhů vzorků s cílem vyšetření jak jednoosé tak tříosé napjatosti. Vzorek je po svém obvodu upnut v přípravku a zároveň protlačován kulovým razníkem (obr. 2.7.8).



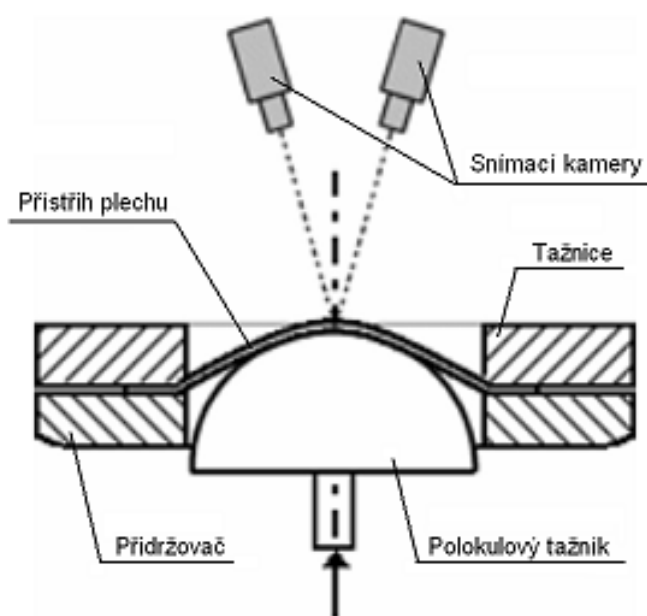
**Obr. 2.7.5:** Optický systém ARAMIS umístěný na zkušební stolici [8]



**Obr. 2.7.6:** Detail náhodného rastru (vlevo) a náhodný rastr na vzorku po deformaci (vpravo)



**Obr. 2.7.7:** Tvar vzorků pro Nakajima test s trhlinou vzniklou po deformaci



**Obr. 2.7.8:** Schéma Nakajima testu

Přednosti systému:

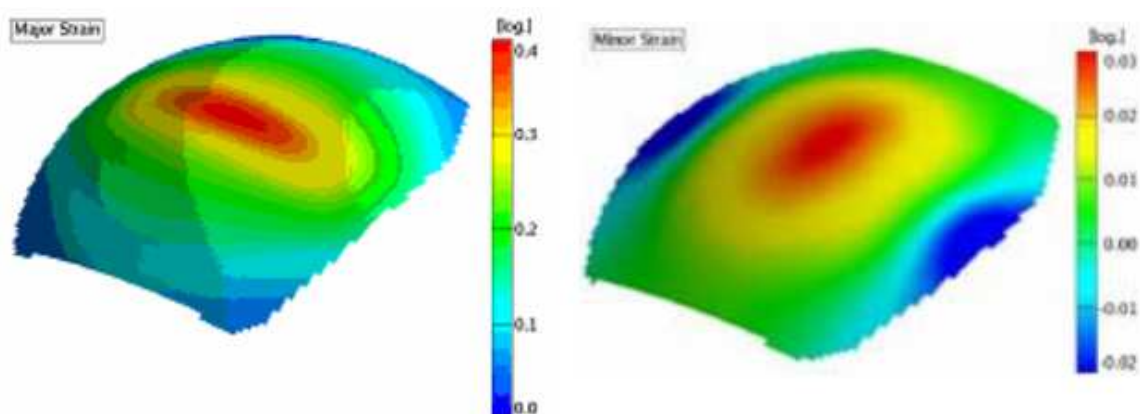
- velký rozsah měření (objekty od velikosti 1mm do 1000mm)
- rozsah měření deformace od 0,05% do stovek %
- jednoduchá příprava objektu (nástřík může být i náhodný)
- vysoká hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)
- flexibilita (snadná změna velikosti záběhu a rozlišitelnosti systému)
- přehledná analýza výsledků měření (grafická vizualizace)
- mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)

Výstupy z měření:

- hodnoty posunutí bodů na povrchu objektu a v radiálním směru
- hodnoty 3D deformace měřené na povrchu objektu
- hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain)
- tvar objektu v jednotlivých fázích deformace (mrak bodů)
- hodnoty změny tloušťky materiálu
- velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC)
- grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot

Oblasti využití systému ARAMIS:

- dimenzování součástek
- zkoušky materiálu, testování nových materiálů, zjištění vlastností materiálu
- ověřování FE analýz (Finite Element – konečných prvků)
- zkoumání materiálu v nelineárních oblastech deformace
- optimalizace procesu tváření (limitní křivka tváření FLC)
- charakteristika procesu tečení a stárnutí
- výpočty stability



**Obr. 2.7.9:** Zobrazení výsledků vyhodnocení hlavní deformace Major Strain (vlevo) a vedlejší deformace Minor Strain (vpravo) [8]

### 2.7.3 Analýza pomocí optického systému PONTOS

PONTOS je mobilní optický systém pro dynamické měření pohybu diskrétních bodů, vibrací a deformací. Systém je často používán při testovacích měřeních v automobilovém a leteckém průmyslu. Pontos je vybaven dvěma kamerami, které jsou synchronizovány a zaznamenávají rychlé sekvence snímků (až 500 za sekundu) ve stereo nastavení. V těchto snímcích jsou zachyceny a graficky zobrazeny 3D souřadnice referenčních značek a jejich posunutí v různých deformačních stavech během zatížení objektu. [7]

Postup měření:

Proces měření je založen na principech optické triangulace. Měřicí rameno systému Pontos se připevní na stativ před měřený objekt. Tento objekt se označí samolepícími a tepelně odolnými diskrétními body, které jsou snímány pomocí dvou kamer. Na snímcích jsou zachyceny a graficky zobrazeny 3D souřadnice referenčních značek a jejich posunutí v různých deformačních stavech během zatížení objektu. Ze získaných dat systém provede vizualizaci a export 3D polohy pohybů bodů měřených v různých stavech zatížení. Tyto pohyby (absolutní nebo relativní) jsou zobrazeny ve výstupním protokolu a lze je exportovat do standardních formátů.

Přednosti systému:

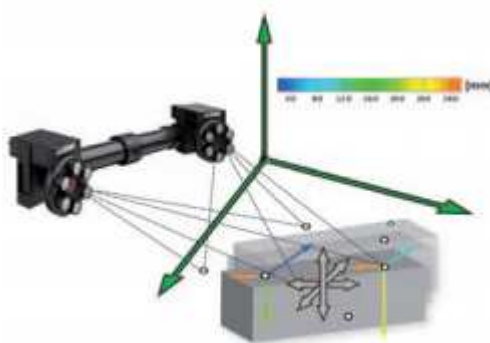
- bezkontaktní měření 3D souřadnic neomezeného počtu bodů
- mobilita, flexibilita, malá hmotnost, kompaktní design
- měření, vizualizace a export 3D polohy a pohybů měřených bodů v různých stavech
- snímkovací frekvence nezávislá na počtu měřených bodů
- snadné přizpůsobení různým úlohám a měřené oblasti
- nezávislost na okolních podmínkách, jako vibrace a změna světla

Výstupy z měření:

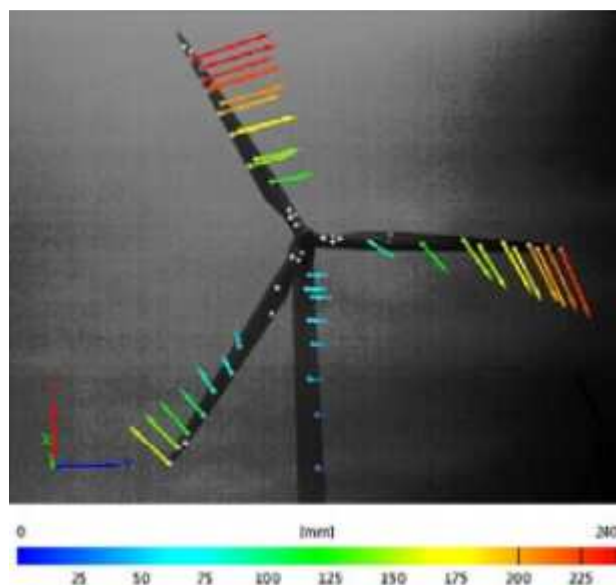
- 3D souřadnice diskrétních bodů
- posunutí, vektory deformace
- grafický a textový protokol měření (png, mpg, html, ascii)

Oblasti využití systému PONTOS:

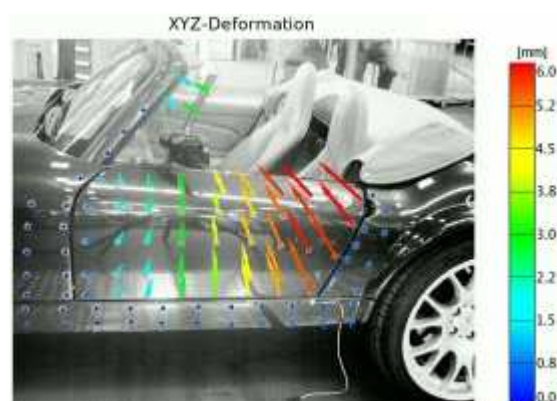
- 3D měření pohybů, deformací a vibrací
- ověření koncepčních designových návrhů a počítačových simulací
- analýza sekvenčních pohybů
- alternativa k měření s akcelerometry do 250 Hz
- dynamika spár a přesazení
- měření relativních pohybů
- útlum, kmitání a tuhost (NHV)
- měření v aerodynamickém tunelu
- zatěžování, tečení a zkoušky stárnutí zahrnující visko-elastické elementy
- měření dynamického chování, nárůst a pokles strukturálního kmitání (kritérium dle Niquista)



**Obr. 2.7.10:** *Princip měření systémem PONTOS (prostorové 3D měření pozic a posunutí bodů, vektory 3D posunutí) [8]*



**Obr. 2.7.11:** Report z měření deformace větrné elektrárny systémem PONTOS (při online snímání lze analyzovat vibrace, kroucení, ohýbání, rychlost, zrychlení a trajektorii) [8]



**Obr. 2.7.12:** Analýza měření deformace systémem PONTOS [8]

## 2.8 Diagramy mezních přetvoření

### 2.8.1 Definice diagramů mezních přetvoření [6]

Při lisování souvisí ztráta stability procesu tváření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu plechu přenášet tvářecí sílu. Ve smyslu definice plastičnosti závisí mezní stupeň přetvoření daného plechu i na stavu napjatosti v průběhu tažení. Označíme-li hlavní normálová napětí v rovině plechu  $\sigma_1, \sigma_2$  ( $\sigma_3 = 0$ , přičemž  $|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$ ) a odpovídající přetvoření  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  jsou definována jako logaritmické deformace, pak lze rovinnou napjatost vyjádřit ve tvaru  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$ , a ukazatel napjatosti  $m_\sigma$

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (23)$$

pak nabývá hodnot  $m_\sigma \in < -1, 1 >$ . Mezní stavy přetvoření daného materiálu lze pak vyjadřovat za daných teplotně – rychlostních podmínek v závislosti na napjatosti. Všechna tři hlavní přetvoření lze vyjádřit jednou veličinou nazývanou kritická intenzita přetvoření  $\varphi_{ik}$ ,

$$\varphi_{ik} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_{1k}^2 + \varphi_{2k}^2 + \varphi_{1k}\varphi_{2k}} \quad (24)$$

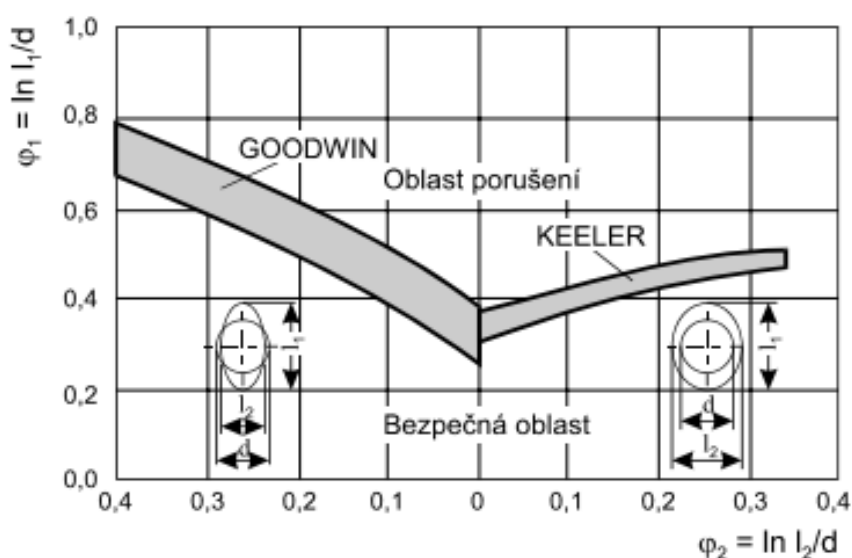
Tímto přístupem lze získat Diagram Mezních Přetvoření (DMP) v souřadnicích  $m_\sigma - \varphi_{ik}$ . K získání DMP lze dojít i kratší cestou než přes výpočet intenzity přetvoření (ze známých hodnot přetvoření) a stavu napjatosti spočteného pomocí vztahů mezi tenzory napětí a přetvoření. K určení diagramů mezních přetvoření lze bezprostředně využít zjištěné hodnoty hlavních normálových přetvoření  $\varphi_{1k}, \varphi_{2k}$ . S touto myšlenkou přišli poprvé Keeler (1965) a Goodwin (1968), kdy byl poprvé představen diagram mezních přetvoření jako závislost největšího přetvoření (Major Strain)  $\varphi_1$  na nejmenším přetvoření  $\varphi_2$  v rovině plechu (obr. 2.8.1). Jednotlivé stavy napjatosti charakterizované opět ukazatelem  $m_\sigma$  (pro prosté zatěžování  $m_\sigma = \text{konst.}$ ) jsou v tomto diagramu představovány paprsky vycházejícími z počátku souřadného systému. Tedy i diagram s těmito souřadnými osami vyjadřuje závislost mezních deformací na napjatosti. Na výlisku nelze obecně určit přímo velikost napětí, je ale možné pomocí deformační sítě bezprostředně změřit hodnoty přetvoření jako následek působící napjatosti.



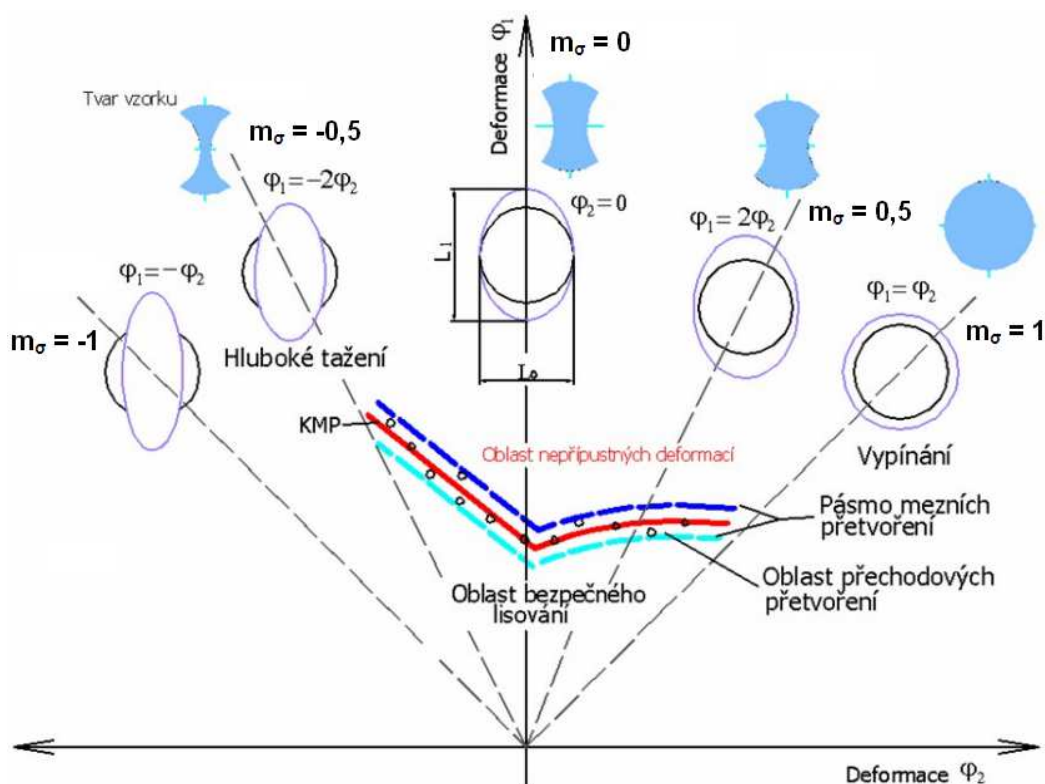
Pro proporcionální přetvoření je výhodné definovat ukazatel stavu přetvoření  $m_\varphi$  vztahem (25)

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (25)$$

je zřejmé, že ukazatel stavu přetvoření  $m_\varphi$  leží ve stejném intervalu jako ukazatel  $m_\sigma$ , tedy  $m_\varphi \in (-1; 1)$ . Vzhledem k těmto skutečnostem bude ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výhodné používat výhradně DMP v souřadnicích  $\varphi_2 - \varphi_1$  a používat ukazatele  $m_\varphi$  namísto  $m_\sigma$ . Praktické zkušenosti ukázali, že ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření ohraničených hodnotami  $m_\varphi = -0.5$  a  $m_\varphi = 1$ . V tomto rozsahu je pak nutné při sestavování diagramů mezních přetvoření modelovat stavy přetvoření. Grafické znázornění této oblasti je vidět na obr. 2.8.2.



**Obr. 2.8.1:** Keeler – Goodwinův diagram [8]



**Obr. 2.8.2:** Stavy přetvoření v DMP charakterizované ukazatelem  $m_\sigma$  [9]

Velikost mezních deformací je dána nejen plastičností plechu, ale je i výrazně závislá na způsobu definování mezního stavu. Za ten lze považovat na jedné straně dosažení meze pevnosti materiálu, na druhé straně je to porušení plechu tvárným lomem. K určení DMP je proto nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů  $m_\sigma$  pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Modelovat různé stavy  $m_\sigma$  lze experimentálně nebo početně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného materiálu. Podle DMP lze hodnotit plastické vlastnosti dvou porovnávaných materiálů, či využít tento diagram ke komplexní analýze přetvoření výlisku.

### 2.8.2 Diagramy mezních přetvoření stanovené početními metodami [6]

Proces plastického přetvoření plechu platný obecně pro jakýkoliv výlisek je v podstatě procesem postupné lokalizace přetvoření, zužování plasticky přetvářených oblastí, jež v konečné fázi přetvoření vedou ke vzniku tvárného lomu.

Při využití početních metod lze křivky mezních přetvoření získat na základě teoretického rozboru vlastností plechů. Hodnoty mezních přetvoření jsou vypočteny, jsou-li zavedeny určité zjednodušující předpoklady, na základě vztahů odvozených z teorie plasticity anizotropního tělesa. Jsou vyjádřeny jako funkce materiálových charakteristik zjišťovaných zkouškou tahem a stavu napjatosti, přičemž se vychází z různých definic mezního stavu. V současné době patří mezi nejrozšířenější následující matematické modely (početní metody) pro výpočet mezních přetvoření.

1. Metoda spočívající na matematickém určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti, tzv. teoretické Keeler – Goodwinovy diagramy mezních přetvoření. Pro „levou“ část DMP je uvažována podmínka lokální ztráty stability a pro „pravou“ část je uvažována podmínka difúzní ztráty stability.
2. Metoda vycházející z faktu, že materiál obsahuje výchozí nehomogenity zapříčiňující vznik lokálních ztenčení, které vedou k porušení, tzv. MK teorie. Tuto metodu výpočtu mezních přetvoření plechu v podmínkách rovinné napjatosti v důsledku lokálního zmenšení tloušťky vytvořili Marciniak a Kucziňsky. Marciniakovo pojetí ztráty stability má velice blízko k realitě plastického přetvoření skutečného plechu. Vlastní výpočet vychází z předpokladu existence počáteční nerovnoměrnosti tloušťky nebo jiné nehomogenity v materiálu, které během tváření zapříčiňují vznik ztenčených oblastí.
3. Metoda vycházející z existence vměstků v materiálu, kolem nichž se tvoří dutiny, jejímž postupným spojením dojde k porušení, tzv. křivka přetvoření dle Ghoshe. Tato metoda výpočtu vychází z druhé krajní polohy definice mezního stavu – dosažení tvárného lomu.

Používané vztahy vycházejí z množství zjednodušujících předpokladů, které nemusí být vždy obecně platné pro všechny materiály a podmínky přetvoření. Teoretické předpoklady řešení jsou často příliš vzdálené od skutečnosti a odvozené vztahy dost obtížně berou v úvahu takové důležité faktory, jako jsou rychlost přetvoření, tloušťka plechu, historie přetvoření, podmínky tření atd. Srovnání vypočtených křivek vycházejících ze stejného kritéria mezního stavu je rovněž velice problematické v důsledku určité nejednotnosti metodik určování základních materiálových charakteristik. Proto je z výše zmíněných důvodů použití teoretických křivek mezních přetvoření pro analýzu deformace skutečného výlisku diskutabilní. Pro řešení praktických problémů se používají diagramy mezních přetvoření získané experimentálním způsobem.

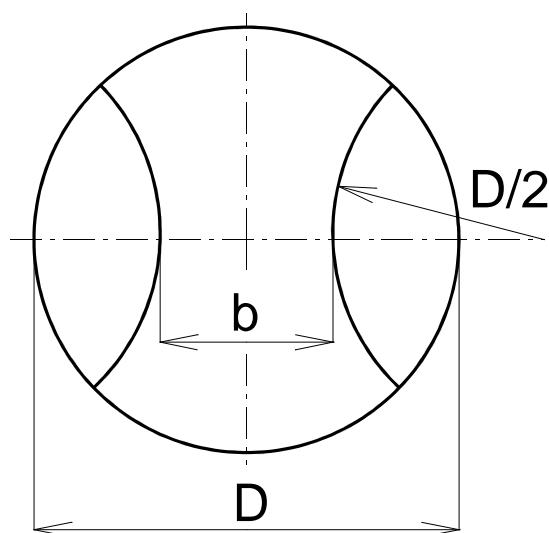
### **2.8.3 Určování diagramů mezních přetvoření experimentálním způsobem [6]**

K určení diagramu mezních přetvoření je nutné získat množství hodnot mezních přetvoření, vždy dvojic  $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ , v rozsahu stavů přetvoření  $m_\varphi \in < -0,5; 1 >$ , při dané definici mezního stavu. Původním postupem uplatněným Keelerem je získání DMP náročné, pracné, zdlouhavé s větším rozptylem získaných mezních přetvoření. Mnohem výhodnější je experimentální modelování stavů přetvoření  $m_\varphi$  v laboratorních podmínkách, např. s využitím trhacích strojů pro zkoušku tahem, zařízení pro hydraulickou zkoušku, či jiným ze speciálních nástrojů. Tyto postupy se liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních vzorků a úplností výsledků, které poskytují. Nejrozšířenější a nejznámější zkoušky jsou:

- Zkouška tahem tyčí opatřených rozmanitými vruby
- Zkouška hydrostatická s kruhovou či eliptickou tažnicí
- Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů
- Zkouška vypínání zkušebních těles s vystřiženými kruhovými segmenty proměnného poloměru

- Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře (tzv. Nakajimova metoda)
- Zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru kruhovým tažníkem

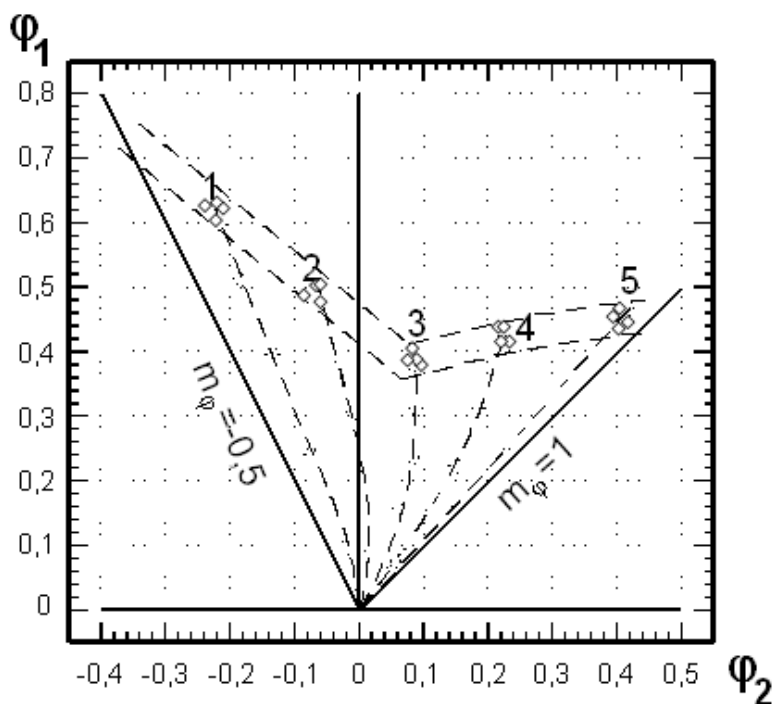
Právě poslední metoda vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou  $b$  se jeví jako nejvhodnější. Tvar zkušebního tělesa je na obrázku 2.8.3. K celé přípravě potřebného sortimentu zkušebních těles nutných k určení diagramu mezních přetvoření v celém požadovaném rozsahu  $m_{\varphi} \in < -0,5; 1 >$  pak postačí jediný střížný nástroj. Zkušební zařízení pro zjištění DMP se skládá ze speciálního nástroje umístěného na dvojčinném lisu. Nástřihy pevně sevřené v oblasti příruby jsou vypínány polokulovým tažníkem o průměru 100 mm až do okamžiku vzniku trhliny či jinak deformovaného mezního stavu. Proces plastického přetvoření je sledován pomocí dvojice vysokorychlostních kamer, které snímají celý proces do okamžiku, než se na testovaném vzorku objeví první trhlina. Kamery jsou součástí optického měřicího systému ARAMIS a jsou napojeny k počítači, kam se zaznamenává celý průběh experimentu.



**Obr. 2.8.3:** Tvarový nástřih k modelování různých stavů přetvoření vypínáním kulovým tažníkem [6]

Vlastní konstrukce DMP je patrná z obr. 2.8.4, kde je DMP vytvořen pomocí vzorků pěti různých šířek, modelujících pět různých stavů přetvoření  $m_\varphi$  představovaných deformačními stopami. Pro rovnoměrné pokrytí požadovaného intervalu stavů přetvoření  $m_\varphi \in < -0,5; 1 >$  je obvykle nutno použít vzorků celkem 13-ti různých šířek. Bylo prokázáno, že deformační stopy získané touto metodou jsou v podstatě lineární, čili lze říci, že se jedná o případ proporcionálního přetvoření.

V případě experimentálního stanovení DMP je nutné velikost mezní deformace stanovit prostřednictvím měření deformační sítě. Otázka tedy je, jakým způsobem zjišťovat na reálném výlisku, a takový zkušební vzorek je, velikost dosaženého přetvoření, jež bude ve smyslu určité deformace považováno za mezní. Jednoznačné definování mezního stavu přetvoření a způsobů jeho určování je velmi důležité, neboť jsou to faktory zásadně ovlivňující polohu a tvar křivek mezních přetvoření.

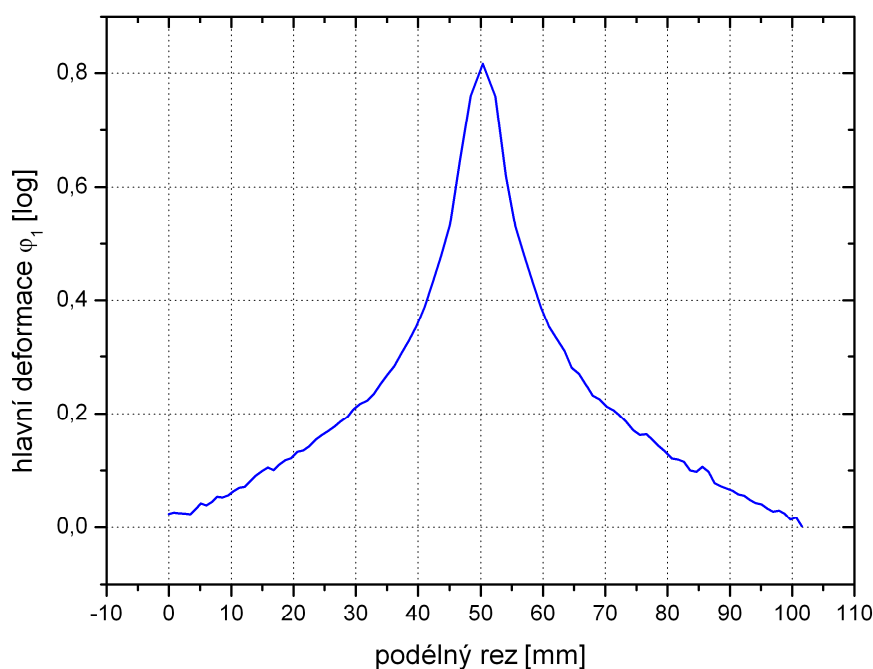


**Obr. 2.8.4:** Diagram mezních přetvoření získaný z 5-ti deformačních stop [6]

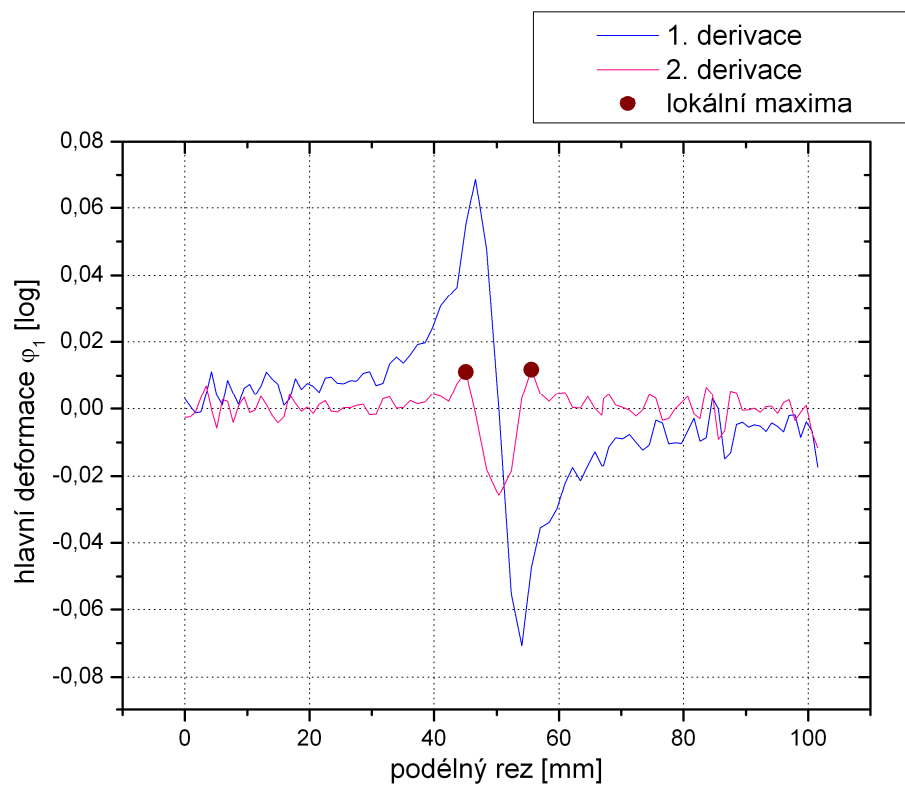
#### 2.8.4 Určování mezního stupně přetvoření

Postup získání mezních deformací upravuje a popisuje norma ISO/DIS 12004-2. Postup vyhodnocení bude uveden pro mezní deformaci  $\varphi_1$ , ale je shodný s postupem vyhodnocení mezní deformace  $\varphi_2$ .

Po nasnímání vzorků a následného zpracování dat pomocí softwaru se vykreslí průběh hlavní deformace  $\varphi_1$ . Vzniklá křivka zobrazená na obrázku 2.8.5 se poté musí dvakrát derivovat, abychom mohli určit lokální maxima zobrazená na obrázku 2.8.6.

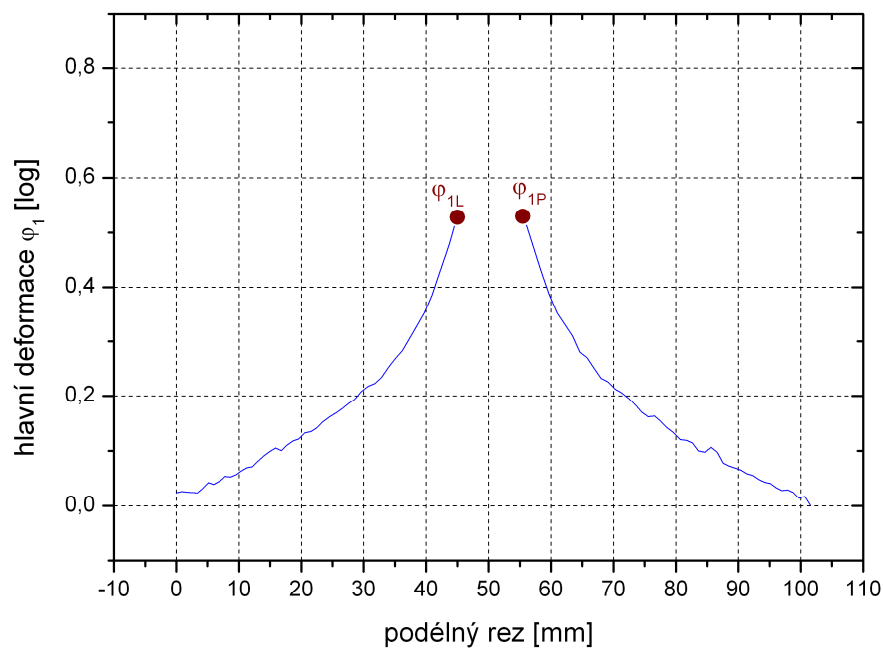


**Obr. 2.8.5:** *Průběh hlavní deformace*



**Obr. 2.8.6:** Tvar křivek první a druhé derivace a určení lokálních maxim

Po určení lokálních maxim následuje oříznutí křivky právě v bodech lokálních maxim, jak je ukázáno na obrázku 2.8.7



**Obr. 2.8.7:** Oříznutí křivky dle lokálních maxim



Poté musíme křivky oříznout ještě z druhé strany. K tomu slouží vzorec 25 určující počet bodů, které zůstanou na každé straně křivky.

$$w = 10 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right), \quad (25)$$

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{1L} + \varphi_{1P}), \quad (26)$$

$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{2L} + \varphi_{2P}), \quad (27)$$

kde:  $w$  – počet bodů

$\varphi_{1m}$  – průměrná hodnota krajních bodů  $\varphi_1$

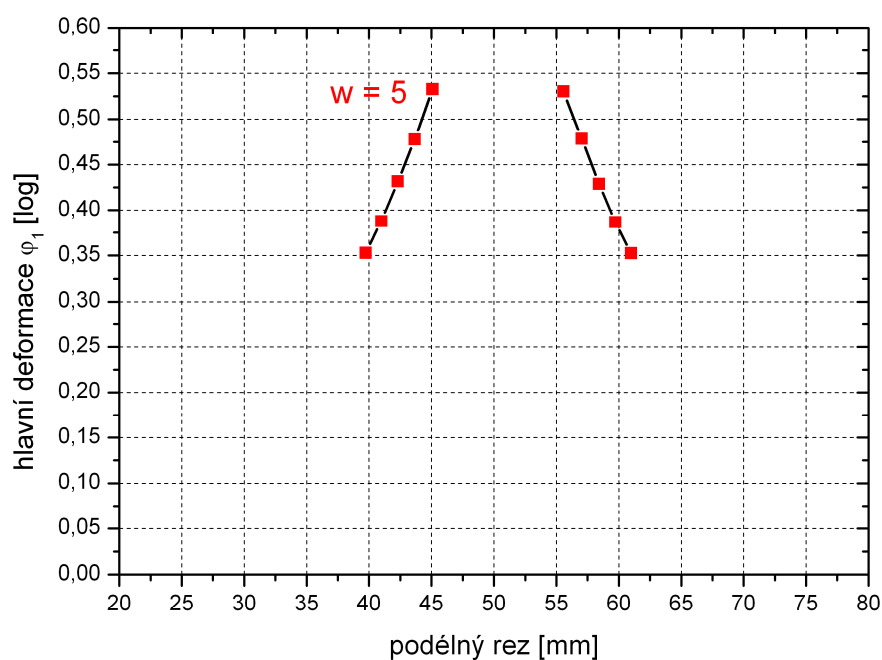
$\varphi_{2m}$  – průměrná hodnota krajních bodů  $\varphi_2$

$\varphi_{1L}$  – hodnota vnitřního krajního bodu levé větve  $\varphi_1$

$\varphi_{2L}$  – hodnota vnitřního krajního bodu levé větve  $\varphi_2$

$\varphi_{1P}$  – hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve  $\varphi_1$

$\varphi_{2P}$  – hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve  $\varphi_2$



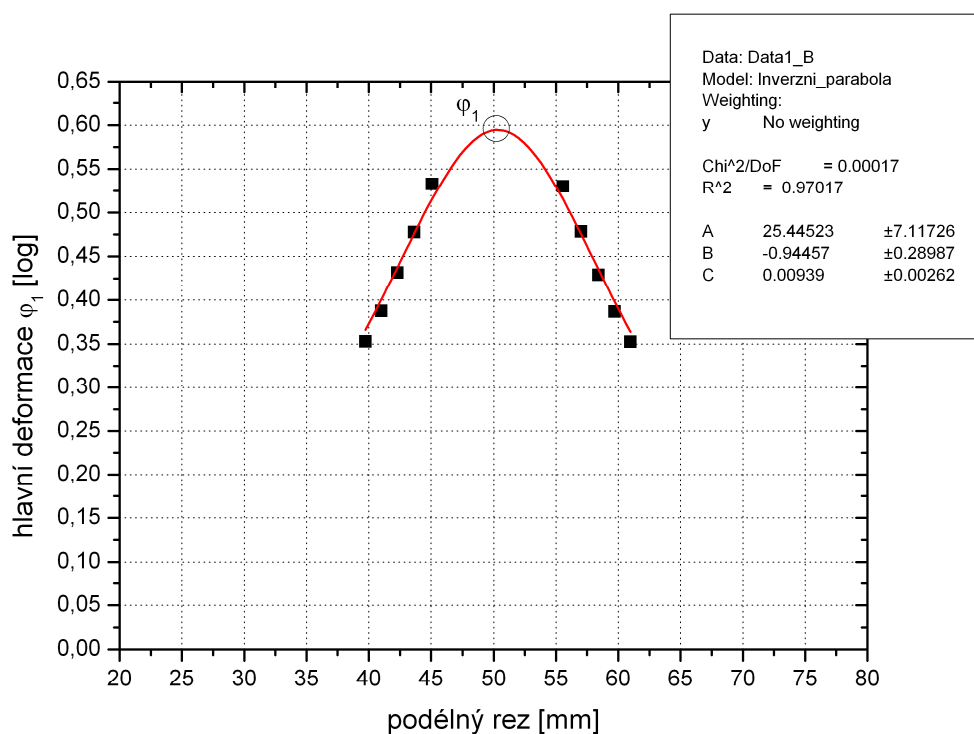
**Obr. 2.8.8:** Oříznutí křivky dle počtu bodů

Nakonec se vzniklé body proloží inverzní parabolou určenou vztahem 28 a po jejím vykreslení se odečte její maximum ( $\varphi_1$ ), popřípadě minimum ( $\varphi_2$ ). Body v maximu (minimu) se následně vynášejí do diagramu mezních přetvoření.

$$y = \frac{1}{p_1 + p_2 \cdot x + p_3 \cdot x^2},$$

(28)

kde:  $p_1, p_2, p_3$  – parametry



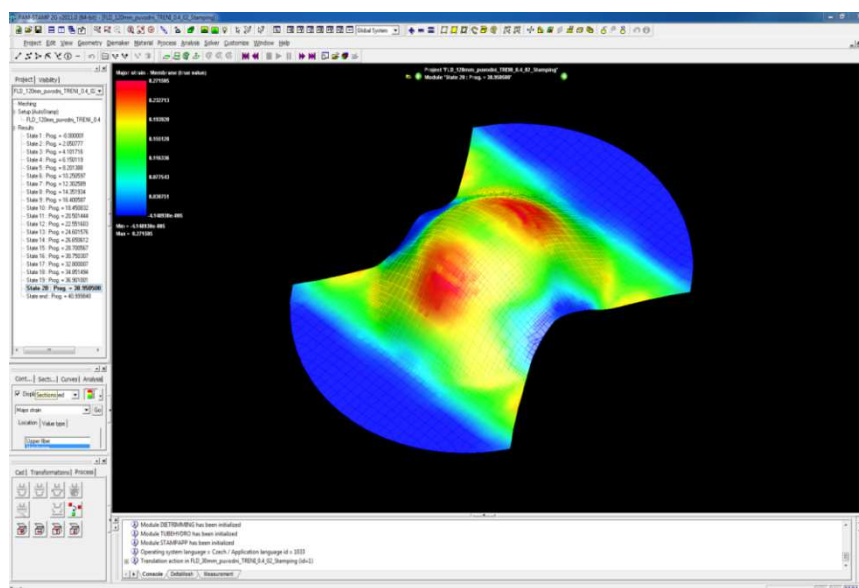
**Obr. 2.8.9:** Inverzní parabola proložená body hlavní deformace  $\varphi_1$

## 2.9 Popis programu PAM-STAMP™ 2G

Programový modul PAM-STAMP™ je specializovaný CAE software pro simulaci plošného tváření technologiemi hlubokého tažení, ohýbání, lisování do pryže (flexformingu), hydroformingu plechů i trubek, speciální materiálový model umožňuje provést i simulaci thermoformingu plastů a kompozitních materiálů. Navazuje na CAD model nástrojů, který je automatickým generátorem převeden ve výpočtovou síť CAE modelu. Výpočtová síť přístřihu plechu je generována v prostředí grafického pre-procesoru spolu s potřebnými okrajovými, kontaktními a zatěžujícími podmínkami řešení. [10]

Časově integrační schéma řešení pohybové rovnice rovnováhy vnitřních a vnějších sil využívá explicitní formulace metody konečných prvků. Při řešení je plně uvažováno s nelineární deformační historií přístřihu plechu. Deformační zpevňování materiálu plechu může být doplněno o citlivost na deformační rychlost. [10]

V důsledku znalosti deformační historie umožňuje PAM-STAMP™ zahrnout do výpočtu kritéria porušování soudržnosti materiálu plechu v průběhu tažení (lokální překročení hraniční plastické deformace, ztenčení, překročení křivky mezních deformací) s přímou vizualizací zvlnění přístřihu plechu v průběhu zavírání přidržovače a tažení. Pro svou obecnou formulaci lze program PAM-STAMP™ použít pro výpočty simulací libovolné výrobní technologie plošného tváření. [10]



Obr. 2.9.1: Pracovní prostředí simulačního programu PAM – STAMP™ 2G

## 3 Praktická část

### 3.1 Stručná charakteristika praktické části

Cílem předkládané diplomové práce je numerická simulace deformace hlubokotažného materiálu v oblastech mezních přetvoření. Pro numerickou simulaci byly voleny podmínky, které reprezentují různé stavy napjatosti materiálu. Získané výsledky byly porovnávány s experimentálně zjištěnými hodnotami deformace. Pro experimentální zjištění rozvoje deformace v oblastech mezních stavů při různých stavech napjatosti byl zvolen tzv. Nakajima test umožňující modelovat požadované stavy napjatosti v laboratorních podmínkách. Průběh uvedeného deformačního testu byl snímán a vyhodnocován bezkontaktním zařízením pro analýzu deformace ARAMIS. V rámci řešení diplomové práce byly provedeny zkoušky pro stavy napjatosti odpovídající jednoosému tahovému zatížení ( $m_\sigma=0$ ;  $m_\varphi=-0,5$ ), stavu napjatosti odpovídající nejnižší plastické deformaci tvářeného plechu ( $m_\sigma=0,5$ ;  $m_\varphi=0$ ) a stavu napjatosti při tzv. rovnoosém zatížení ( $m_\sigma=1$ ,  $m_\varphi=1$ ). Vybrané charakteristické stavy napjatosti dostatečně reprezentují deformační chování testovaného materiálu.

V rámci řešení diplomové byla dále provedena numerická simulace deformace materiálu při zachování stejných geometrických podmínek jako v případě experimentálních testů. Další požadované vstupní hodnoty do numerické simulace jsou materiálová data charakterizující chování tvářeného materiálu. Standardně se tyto hodnoty zjišťují ze statické zkoušky tahem, kde se zjišťuje křivka zpevnění definována tzv. Holomonovým aproximačním vztahem a koeficienty normálové anizotropie pro směry  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  v úči směru válcování plechu. Tento postup byl zvolen i v této diplomové práci a data ze statické zkoušky tahem byly využity jako vstupní hodnoty do numerické simulace v prostředí PAM – STAMP<sup>TM</sup> 2G. Kombinace takto zjištěných materiálových charakteristik, geometrie tvaru přístříhu a nástroje tvořily první část prováděné numerické simulace. Vzhledem k tomu, že cílem diplomové práce bylo provedení výpočtu deformace metodou konečných prvků v oblastech mezních stavů, bylo třeba definovat chování materiálu i za mezí pevnosti. Požadované hodnoty pro křivku zpevnění v oblasti za mezí

pevnosti byly poskytnuty se souhlasem studenta Bc. Lukáše Horáka, který ve své diplomové práci v rámci experimentu prováděl tahovou zkoušku zvoleného materiálu a analyzoval pomocí systému ARAMIS oblast nestabilních deformací v oblasti tzv. krčku testovaného materiálu. Výsledkem diplomové práce Bc. Lukáše Horáka je křivka zpevnění charakterizující chování materiálu i v této nestabilní části materiálu. Kombinace takto získaných hodnot křivky zpevnění, geometrie nástroje a přístřihu sloužily jako vstupní hodnoty pro druhou část řešení diplomové práce v oblasti numerických simulací.

Jako srovnávací kritérium výsledků získaných numerickou simulací a experimentálně zjištěnými hodnotami deformace byly voleny průběhy hlavní deformace  $\varphi_1$  (Major Strain) a vedlejší deformace  $\varphi_2$  (Minor Strain) v závislosti na hloubce tažení. Cílem bylo zjistit, jaký vliv bude mít změna parametrů ve výpočtovém modelu na průběh deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  v oblasti mezních stavů deformace.

### **3.2 Volba materiálu pro experimentální část**

Pro vyhotovení experimentů této diplomové práce byl zvolen materiál DC 05 + ZE 75/75 – BPO (označení dle EN 10152) o jmenovité tloušťce 0,8 mm. Jedná se o hlubokotažný materiál válcovaný za studena, elektrolyticky pozinkovaný a určený k tváření za studena. Tento materiál se využívá v automobilovém průmyslu na výrobu karoserií automobilů. Materiál poskytla firma ŠKODA AUTO a.s.

### **3.3 Stanovení mechanických hodnot materiálu**

#### **3.3.1 Stanovení materiálových hodnot zkouškou tahem**

Ke zjištění materiálových hodnot byla provedena zkouška tahem, jejíž základní vztahy pro výpočet hodnot byly uvedeny v kapitole 2.3. Zkouška tahem byla provedena na Technické univerzitě v Liberci, v laboratoři zkoušení kovů, spadající pod Oddělení tváření kovů a plastů. Laboratoř je vybavena strojem TiraTest 2300 (obr. 3.3.1), který je opatřený průtahoměrem

MFN – A. K vyhodnocení naměřených hodnot posloužil počítač vybavený softwarem LabTest 4, který je schopen vyhodnotit všechny základní mechanické hodnoty testovaného materiálu. Tvar a rozměry zkušební vzorku pro zkoušku tahem jsou dány normou EN ISO 6892 – 1. Jelikož se zkoušený materiál vyrábí válcováním za studena, tak lze u něho předpokládat anizotropii, čili měnící se vlastnosti v závislosti na směru válcování. Z tohoto důvodu byly zkušební vzorky odebrány ve směrech 0°, 45° a 90° v úči směru válcování. Pro každý směr válcování se k měření použito šest vzorků, na nichž se provedla tahová zkouška. Získaná data se použila k vykreslení diagramů pomocí programu Microsoft Office Excel 2007.

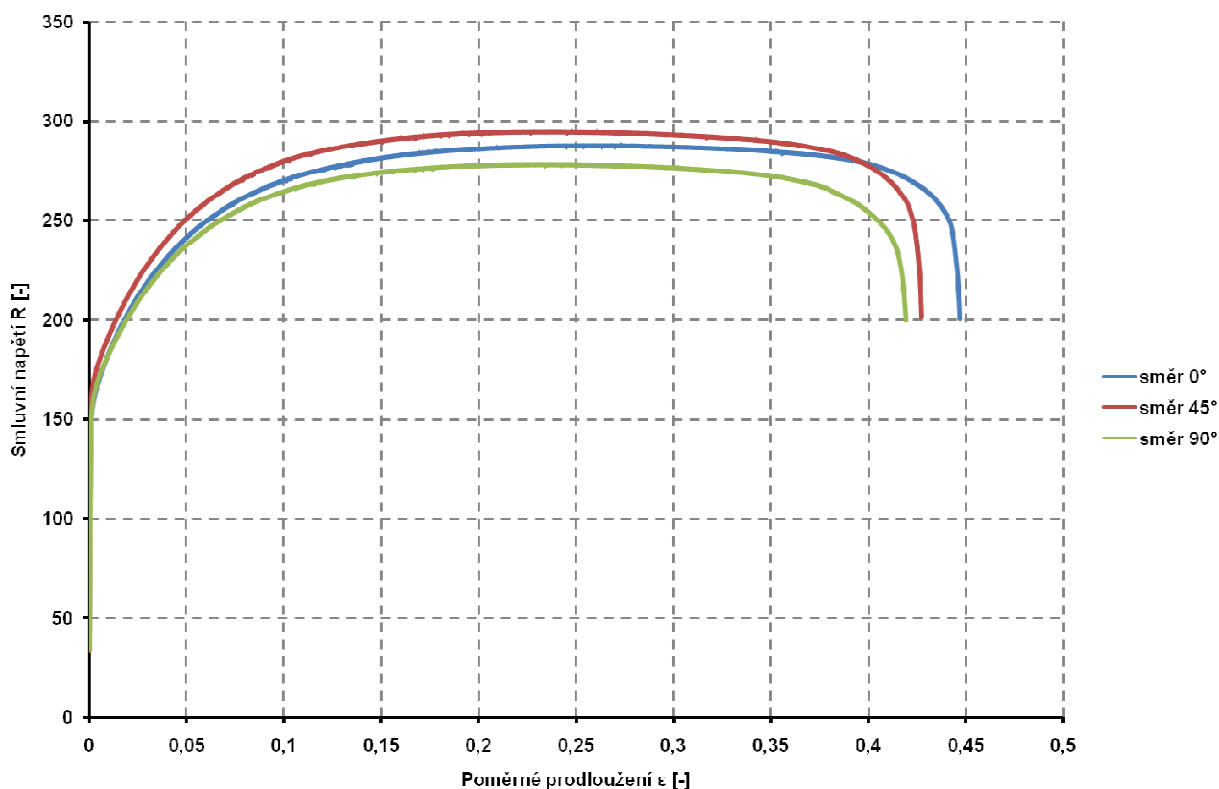


**Obr. 3.3.1:** *Stroj TiraTest 2300*

Ze známých rozměrů vzorků a dat získaných tahovou zkouškou, můžeme za použití vztahů (1) a (2) vykreslit diagramy závislosti smluvního napětí  $R$  na poměrné deformaci  $\varepsilon$ , zobrazených na obrázku 3.3.2, ze kterých odečteme smluvní mez pevnosti  $R_m$ , smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  a celkovou tažnost  $A_{80mm}$ .

Dále můžeme pomocí vztahů (11) a (14) stanovit diagram závislosti skutečného napětí  $\sigma$  na skutečné deformaci  $\varphi$ . Tyto diagramy jsou zobrazeny v příloze 1.

Následující krokem je určení konstanty monotónního zpevnění  $C$  a koeficient deformačního zpevnění  $n$ . Tyto hodnoty se poté budou zadávat při numerické simulaci v programu PAM – STAMP<sup>TM</sup> 2G a pro simulaci mají velký význam, protože popisují charakteristické vlastnosti materiálu. K získání hodnot je zapotřebí aproximovat diagram skutečného napětí  $\sigma$  na skutečné deformaci  $\varphi$ . Aproximace se provede dle ČSN ISO 102 75 v intervalu  $\varepsilon = 5\% \div A_g$ . Rozsah aproximace od malého stupně přetvoření nám umožní zjistit přesné hodnoty konstanty monotónního zpevnění  $C$  a koeficient deformačního zpevnění  $n$ . Výsledné aproximované diagramy jsou uvedeny v příloze 2.



**Obr. 3.3.2:** Diagram statické zkoušky tahem pro směry válcování 0°, 45° a 90°

Z diagramu závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci je patrné, že materiál DC 05 + ZE 75/75 – BPO je vhodný pro hluboké tažení.

Nyní zbývá určit součinitel normálové anizotropie  $r$ , který se měřil opět pomocí stroje TiraTest 2300. Měření se provádělo pro každý směr válcování. Výsledný výsledek součinitele normálové anizotropie získaný z různých směrů válcování je uveden v tabulce 2. Při numerické simulaci se zadávali do programu hodnoty normálové anizotropie pro každý směr válcování. Tato data jsou uvedena v tabulce 1. Vzorky se shodují se vzorky použitými na zkoušku tahem s tím rozdílem, že každý vzorek je orýsován v příčném směru ryskami, vzdálenými od sebe 10 mm. Každý vzorek se musí před testem důkladně proměřit přesnými měřidly. K měření délky byl použit Abbeho komparátor vyobrazený na obrázku 3.3.3, který umožňuje měřit vzorky do délky 100mm. Šířka vzorku se měřila digitálním úchylkoměrem Mitutoyo 543 – 561 – 1 s přesností 0,001 mm. Pro větší přesnost byly vzorky proměřovány na třech místech, a to uprostřed a blízko okrajů proměřované části vzorku, která byla dlouhá 80 mm. Anizotropie je měřena při 20% prodloužení vzorku, proto se tažení na stroje TiraTest 2300 ukončilo při dosažení konečné délky vzorku 96 mm. K odměření této vzdálenosti se použil program LabTest. Po ukončení testu se následně prodloužené vzorky opět proměřily na stejných třech místech jako před testem jak ve směru délky, tak ve směru šířky za použití Abbeho komparátoru a digitálního posuvného měřítka.



**Obr. 3.3.3:** *Abbeho komparátor*



Všechny důležité mechanické hodnoty materiálu naměřených statickou zkouškou tahem, včetně směrodatných odchylek označených písmenem s jsou shrnuty a uvedeny v tabulce 1.

**Tab. 1:** *Průměrné mechanické hodnoty materiálu*

Směr	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80mm}$ [%]	$A_g$ [%]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$r$ [-]
0°	285,4	160,5	44,58	25,22	0,2263	500,8	1,877
s	3,8	2,3	0,23	0,05	0,0005	5,9	0,001
45°	292,0	170,3	42,23	23,04	0,2167	506,5	1,494
s	2,1	1,0	0,88	0,55	0,0005	3,2	0,003
90°	280,9	166,4	42,03	22,82	0,2137	484,9	2,290
s	2,3	1,9	0,60	0,47	0,0009	2,5	0,028

Vzhledem k odběru vzorků ve směrech 0°, 45° a 90° se hodnoty získané z těchto směrů musí přepočítat na hodnotu směrově střední danou následujícím vztahem:

$$x_s = \frac{x_0 + 2 \cdot x_{45} + x_{90}}{4}, \quad (29)$$

kde:  $x_s$  – směrově střední hodnota

$x_0, x_{45}, x_{90}$  – hodnoty zjištěné ve směrech 0°, 45°, 90° dle směru válcování

Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

**Tab. 2:** *Střední mechanické hodnoty materiálu*

	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	$A_g$ [%]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$r$ [-]
$x_s$	287,57	166,87	42,77	23,53	0,2188	502,3	1,7888

### 3.3.2 Získání hodnot deformací pomocí systému ARAMIS

K modelování stavů přetvoření experimentálním způsobem se používá řada metod popsanych v kapitole 2.8.3. V této diplomové práci byla použita metoda vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou, která je na katedře strojírenské technologie TU v Liberci dlouhodobě používána.

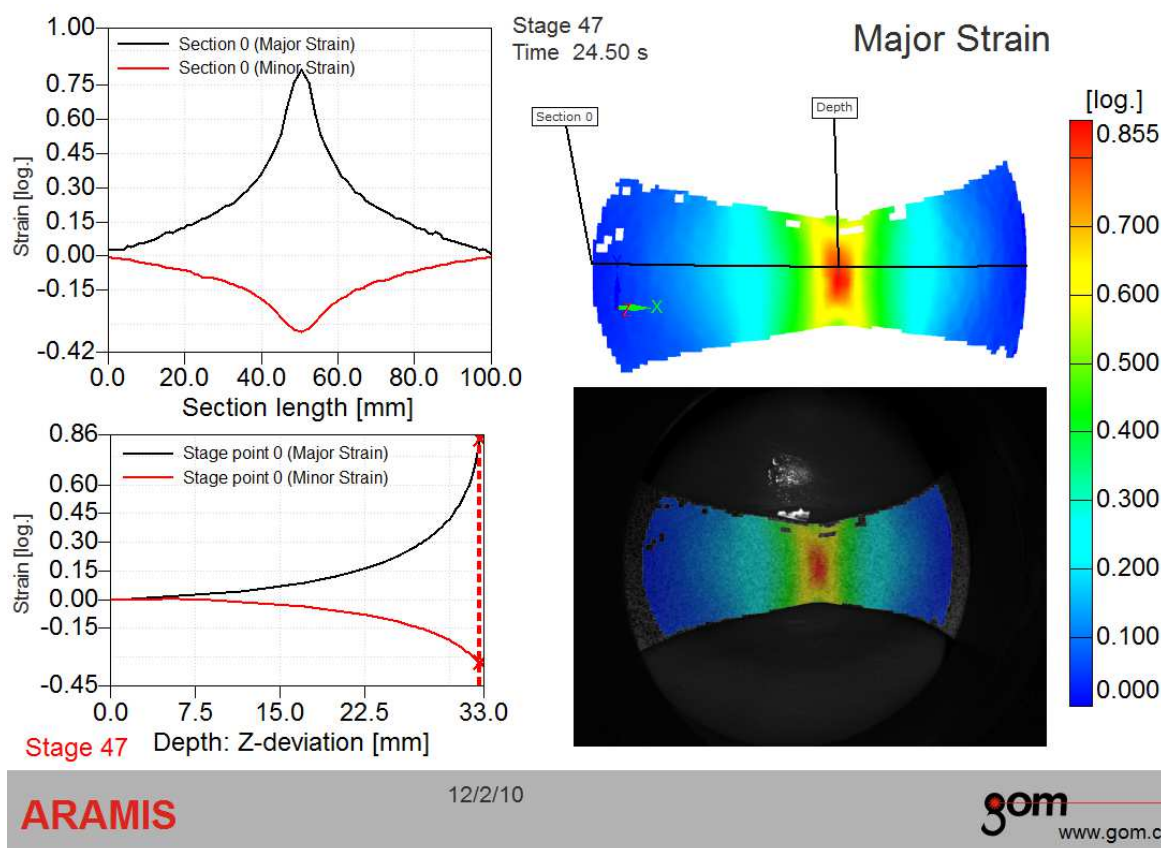
K experimentu byly použity kruhové přístřihy o průměru 210 mm a šířkou můstku  $b$ . Šířka můstku  $b$  byla 30 mm, 120 mm a 210 mm (průměr přístřihu). Pro každou jednotlivou šířku bylo použito čtyř vzorků. Na odmaštěné a očištěné vzorky se před samotným testováním nanese pattern vytvořený kombinovaným nástřikem šedé barvy a černé barvy.

Zkušební zařízení pro vypínání tvarových zkušebních těles se skládá ze speciálního nástroje umístěného na hydraulickém dvojčinném lisu CBA 300/63 (obr. 3.3.4), na němž jsou kruhové přístřihy pevně sevřeny v oblasti příruby a vypínány kulovým tažníkem o průměru 100 mm. Proces plastického přetvoření je sledován pomocí dvojice kamer, které snímají celý proces do okamžiku, než se na testovaném vzorku objeví první trhlinka. Kamery jsou součástí optického měřicího systému ARAMIS a jsou napojeny k počítači, kam se zaznamenává celý průběh experimentu.

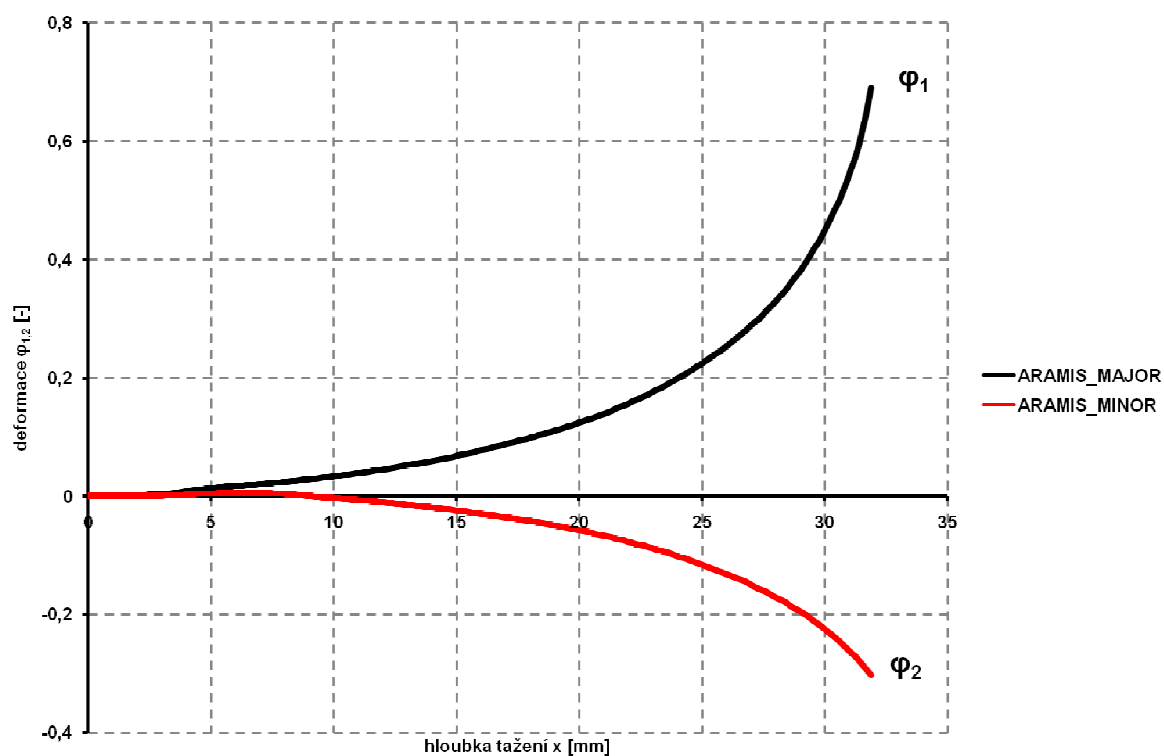


**Obr. 3.3.4:** *Hydraulický lis CBA 300 s optickým systémem ARAMIS*

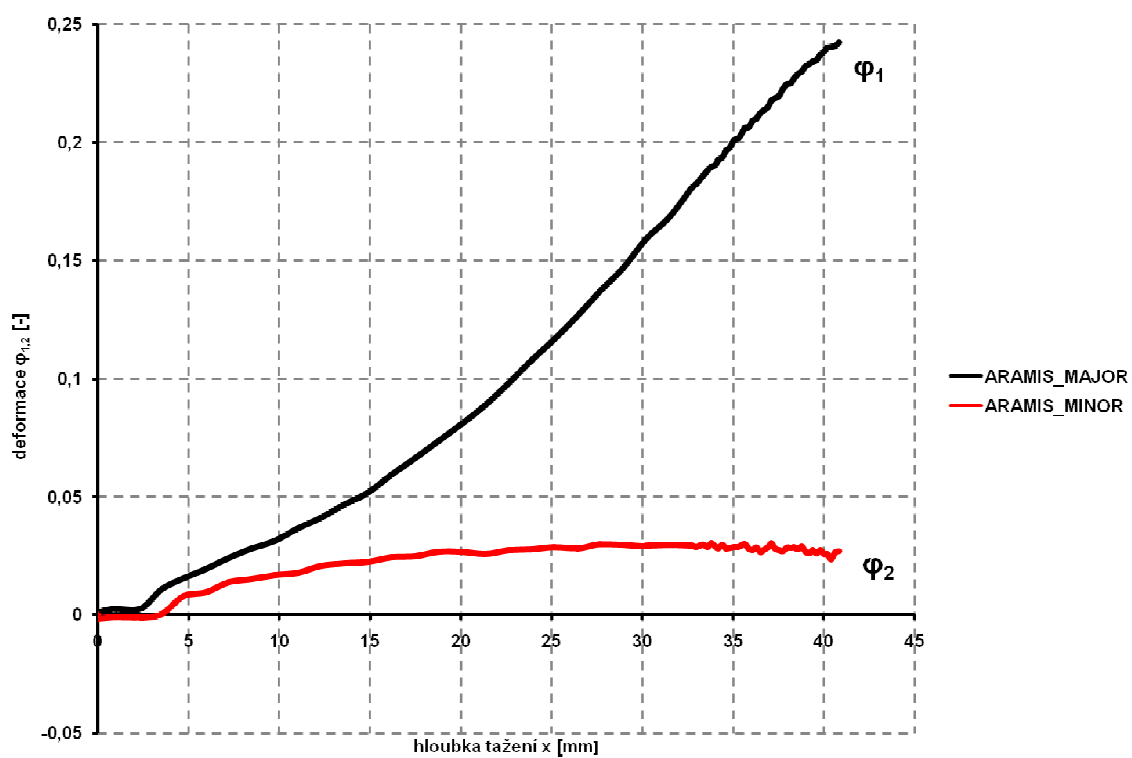
Následně se získaná data zpracovávala pomocí softwaru ARAMIS, kde se na vyhodnocovaném vzorku vybral bod v oblasti mezních deformací před vznikem trhliny a pro něj se vygeneroval průběh deformace. Ze všech vzorků se pro jednotlivé šířky vygenerovaly grafy závislosti hlavní (MAJOR Strain) a vedlejší (MINOR Strain) deformace na hloubce tažení. Vyhodnocení deformací ze systému ARAMIS pro šířku můstku 30 mm je na obrázku 3.3.5. Zbylé šířky jsou zobrazeny v příloze 4. Diagram vlevo nahoře na obr. 3.3.5 zobrazuje průběh hlavní deformace (MAJOR Strain – křivka černé barvy) a vedlejší deformace (MINOR Strain – křivka červené barvy) po celé délce zvoleného řezu. Diagram vlevo dole na obr. 3.3.5 zobrazuje průběh hlavní a vedlejší deformace ve zvoleném bodě, v průběhu změny hloubky tažení. Protože se u jednotlivých šířek prováděl experiment na čtyřech vzorcích, vyexportovala se data ze softwaru ARAMIS do programu OriginLab Pro 7.5, s jehož pomocí se vygenerovaly průměrné křivky jednotlivých šířek zobrazené na obrázcích 3.3.6, 3.3.7 a 3.3.8.



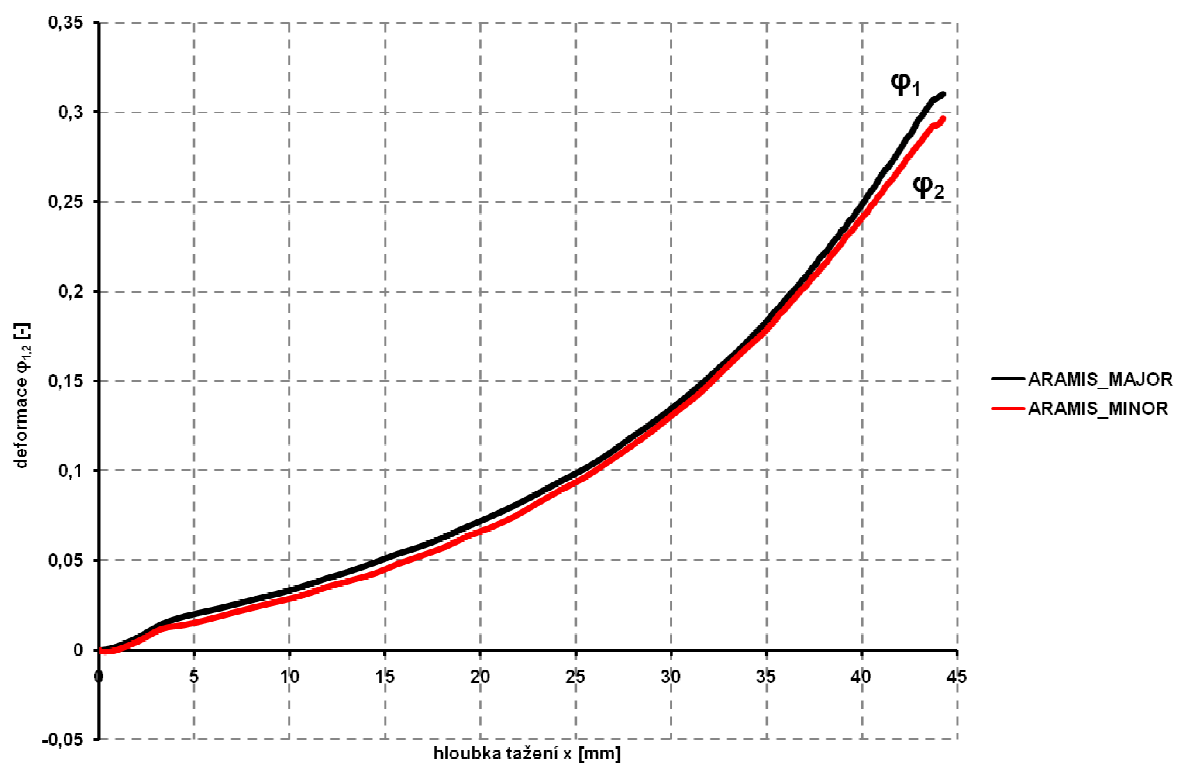
**Obr. 3.3.5:** Vyhodnocení průběhu deformací pro šířku 30 mm pomocí systému ARAMIS



**Obr. 3.3.6:** Průměrné křivky deformací pro šířku 30 mm ze systému ARAMIS



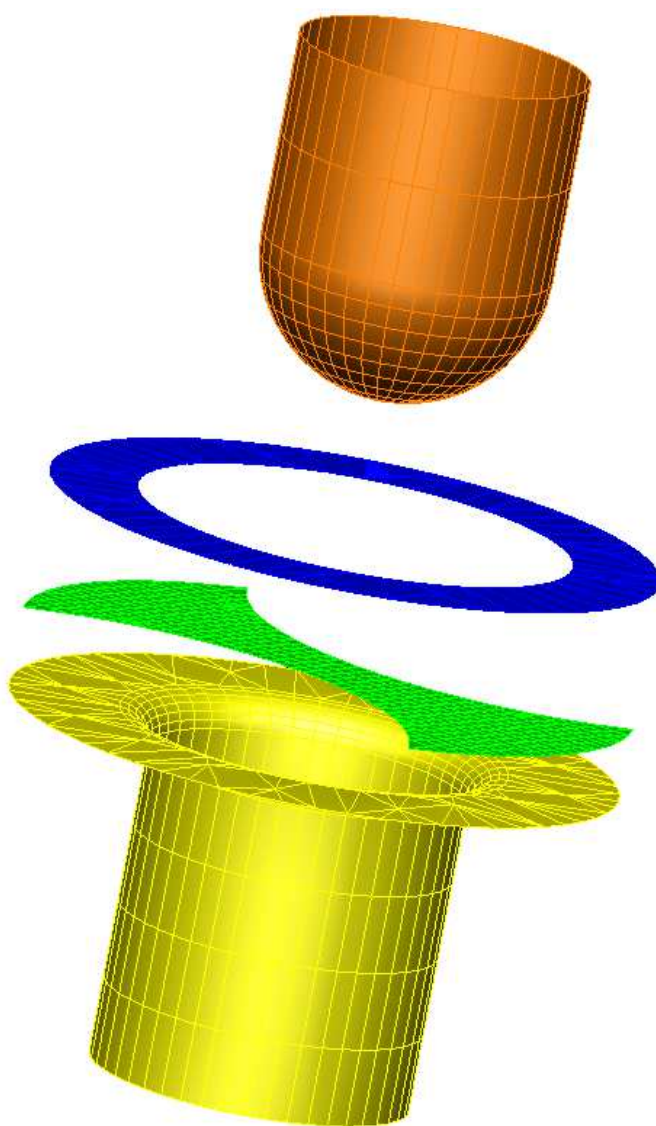
**Obr. 3.3.7:** Průměrné křivky deformací pro šířku 120 mm ze systému ARAMIS



**Obr. 3.3.8:** Průměrné křivky deformací pro šířku 210 mm ze systému ARAMIS

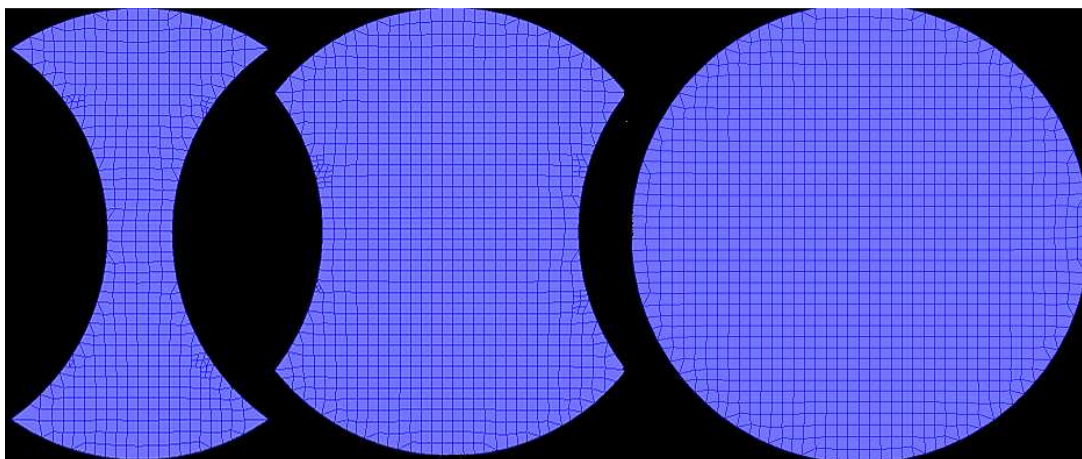
### 3.3.3 Simulace v programu PAM – STAMP™ 2G

Před samotnou simulací bylo nutno vytvořit model, který se skládá z tažníku, tažnice, přidržovače a vytvořit tvar kruhových přístřihů o šířkách mŕstků 30 mm, 120 mm a 210 mm, na kterých se simulační proces prováděl. Tyto prvky byly vymodelovány pomocí CAD systému CATIA a poté převedeny do programu PAM – STAMP™ 2G verze 2011. Celá soustava je zobrazena na obr. 3.3.9. Vzorky pro simulaci vytvořené v pomoci programu CATIA jsou na obrázku 3.3.10.



**Obr. 3.3.9:** Model soustavy (shora – tažník, přidržovač, tvarový přístřih plechu a tažnice)





**Obr. 3.3.10:** Vzorky pro simulaci vytvořené pomocí programu CATIA  
(vlevo – šířka 30 mm, uprostřed – šířka 120 mm, vpravo – šířka (průměr)  
210 mm)

Po vytvoření modelu je nutné nadefinovat mechanické vlastnosti materiálu (modul pružnosti  $E$ , Poissonovo číslo  $\nu$ , hustotu  $\rho$ , hodnoty normálové anizotropie v jednotlivých směrech  $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$ ). Materiálové hodnoty se vložili do materiálového listu, který se následně uložil do databáze materiálů. Protože se při experimentu používal jeden typ materiálu, tak se při každé změně šířky můstku vyexportoval z databáze materiálový list a odpadlo tím opětovné zadávání materiálových hodnot. Materiálový list je vyobrazen na obr. 3.3.11. Pro křivku zpevnění byl použit model Krupkowsky. Do tohoto modelu se zadala data konstant  $C$  a  $n$ . Hodnota  $\varepsilon_0$  se určila vyjádřením ze vzorce pro vykreslení aproximační křivky:

$$\sigma = C \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n, \quad (30)$$

kdy dosazením za  $\varepsilon_p = 0$  vznikl úpravou vzorec (31)

$$\varepsilon_0 = \sqrt[n]{\frac{\sigma}{C}}, \quad (31)$$

kde  $\sigma$  je mez kluzu. Po dosazení vyšla hodnota plastické deformace  $\varepsilon_0 = 0,0063$ , která se následně dosadila do výpočtu pro křivku zpevnění zobrazenou na obrázku 3.3.12.

**Material**

Name: DC\_05\_LESAK  
 Type: Standard steel

Mechanics ☐ Thermal ☐ Metallurgy

Parameters  
 E: 210  $\nu$ : 0.3  $\rho$ : 7.8E-6

Plasticity law: Hill 48  
☐ Ito-Goya plasticity  $K_0$ :  
 Anisotropic type: Orthotropic  
 $r_0$ : 1.877  $r_{45}$ : 1.494  $r_{90}$ : 2.29  
☐ Non-associated plasticity: Experimental  
 Re0: Re45: Re90:  
 Defined in hardening curve

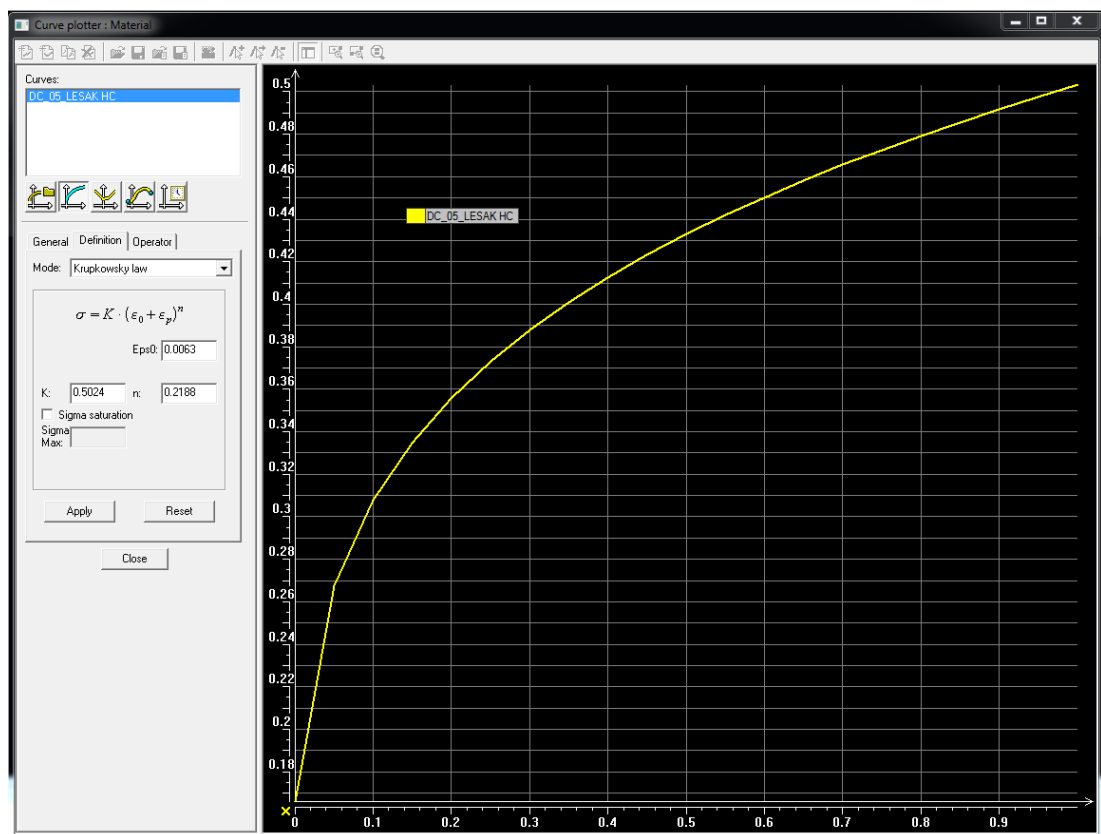
☐ Matern failure criterion 0 forming limit curve(s)

Parameters

Hardening curve  
 Definition: Krupkowsky law  
 Name: DC\_05\_LESAK HC  
 Kinematic model: Parameters  
☐ Strain rate model: Parameters

OK Cancel

Obr. 3.3.11: Materiálový list s vyplněnými hodnotami

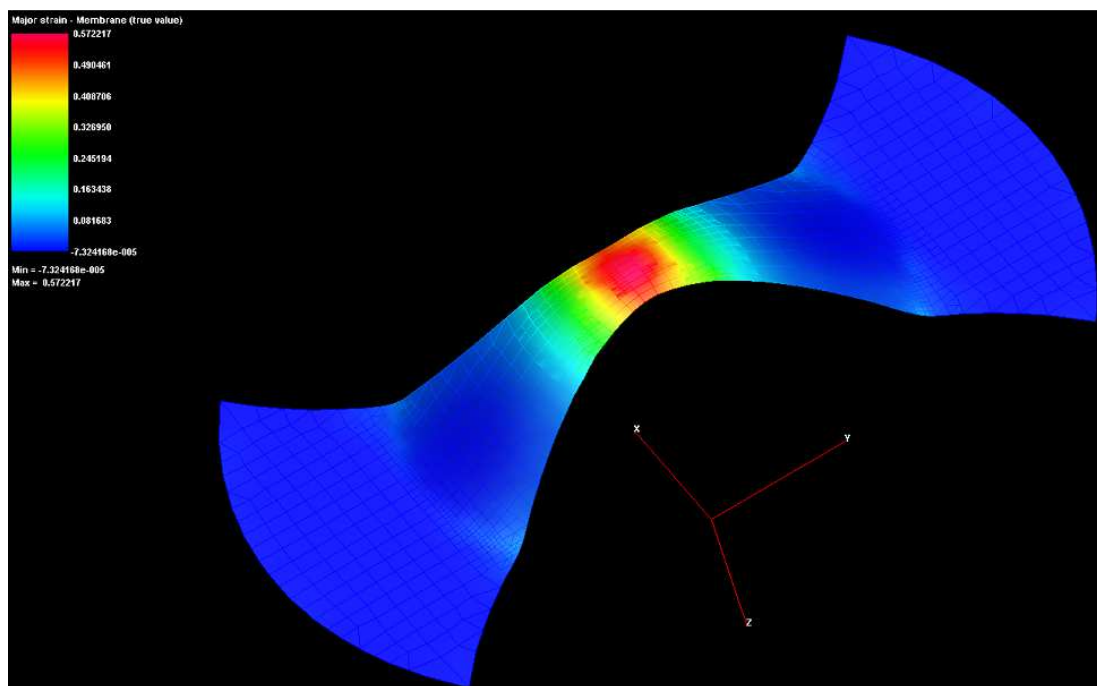


Obr. 3.3.12: Vykreslený průběh aproximační křivky dle Krupkowského

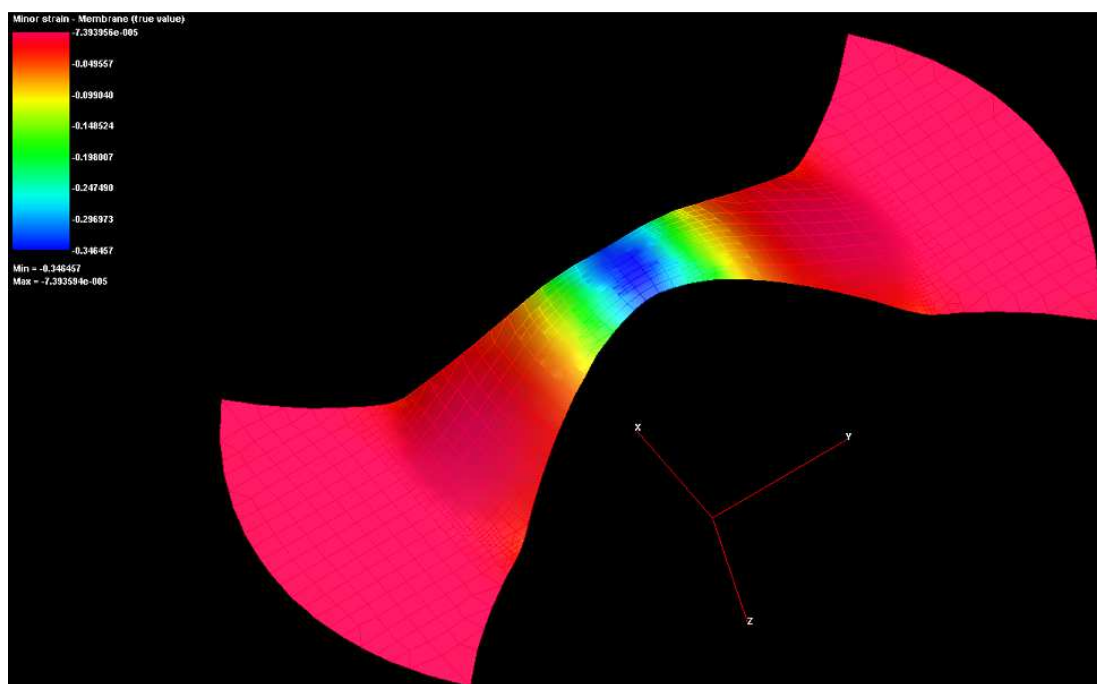


Po definici materiálu je nutno definovat technologické podmínky při tvářecím procesu. Tyto podmínky se definovali podle reálných stavů dosažených při vypínání tvarových zkušebních těles. Technologické podmínky se při simulaci neměnily. Výjimku tvořil koeficient tření, kdy se pro jednotlivou šířku můstku prováděla simulace s koeficientem tření 0,02 a 0,04. Simulace pro dva koeficienty tření se dělala za účelem získání nejbližších reálných výsledků, protože při metodě vypínání tvarových zkušebních těles je nutné, aby oblast vyhodnocování byla takřka bez tření. Proto se tažník lisu zakryl plastovou kruhovou destičkou pomazanou mazadlem, aby došlo maximálnímu snížení tření. Vzhledem k nemožnosti zjištění velikosti koeficientu tření a předpokladu, že tření bude vlivem použitého mazadla minimální, se proto při simulaci přistoupilo k použití těchto malých koeficientů.

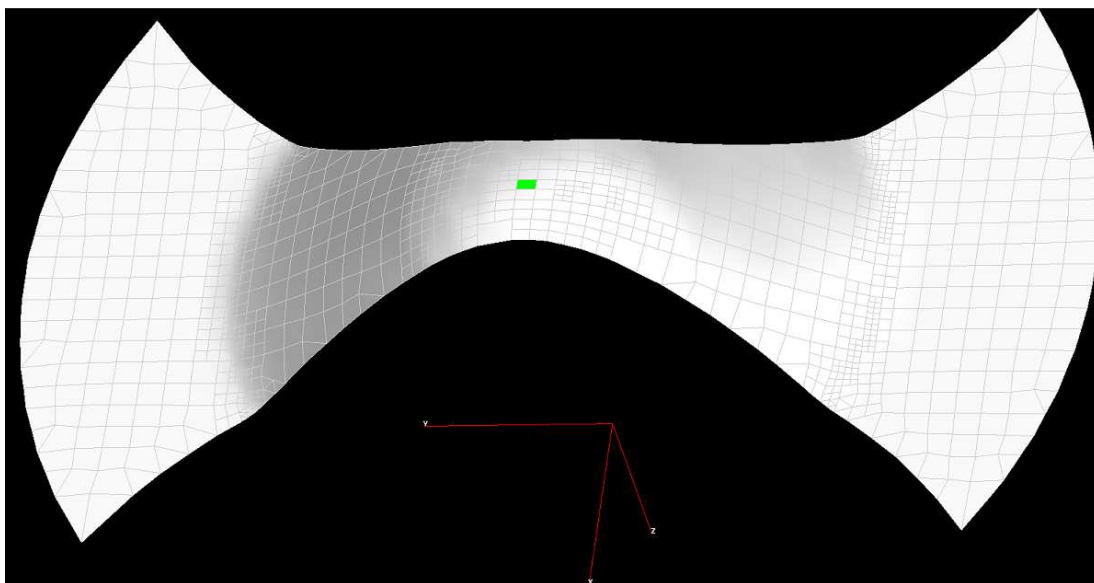
Před spuštěním simulace se ještě zadala hloubka tažení, která po jejím dosažení ukončí proces simulace. Pro šířku můstku 30 mm se zadala hloubka tažení 32 mm, pro 120 mm byla 41 mm a pro 210 mm byla hloubka tažení 44 mm. Hodnoty hloubek tažení se stanovili při vyhodnocování deformací pomocí systému ARAMIS, kdy na výtažcích docházelo k výskytu prvních trhlin. Pro sledování procesu tažení se zadal počet ukládajících se stavů při simulaci na 20. Následně se spustil simulační proces, po jehož ukončení vznikly numerické modely deformací zobrazené na obrázcích 3.3.13 a 3.3.14, nebo po zvolení elementu na zdeformovaném modelu plechu program PAM – STAMP<sup>TM</sup> 2G je možné vykreslit křivky deformací vybraného bodu prezentované na obrázku 3.3.16. Pro naše potřeby srovnání s reálnými křivkami bylo nutné vyexportovat data křivek deformací pro všechny šířky a vykreslit křivky hlavní (MAJOR) a vedlejší (MINOR) deformace pomocí programu EXCEL 2007. Takto získané křivky se porovnávali s křivkami vygenerovanými systémem ARAMIS, představující reálný výsledek. Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 3.3.17, 3.3.18 a 3.3.19.



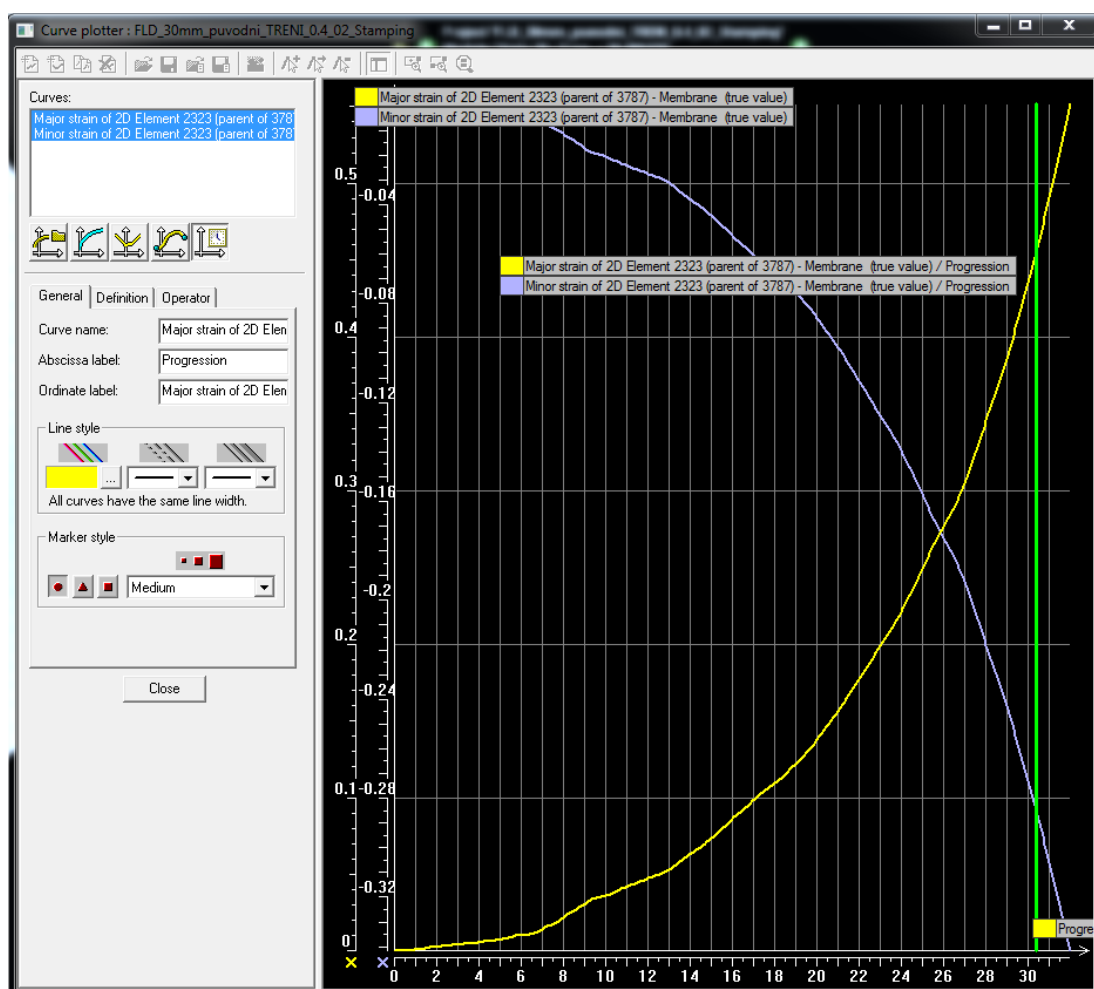
**Obr. 3.3.13:** Numerický model hlavní (MAJOR) deformace vzorku širokého 30 mm



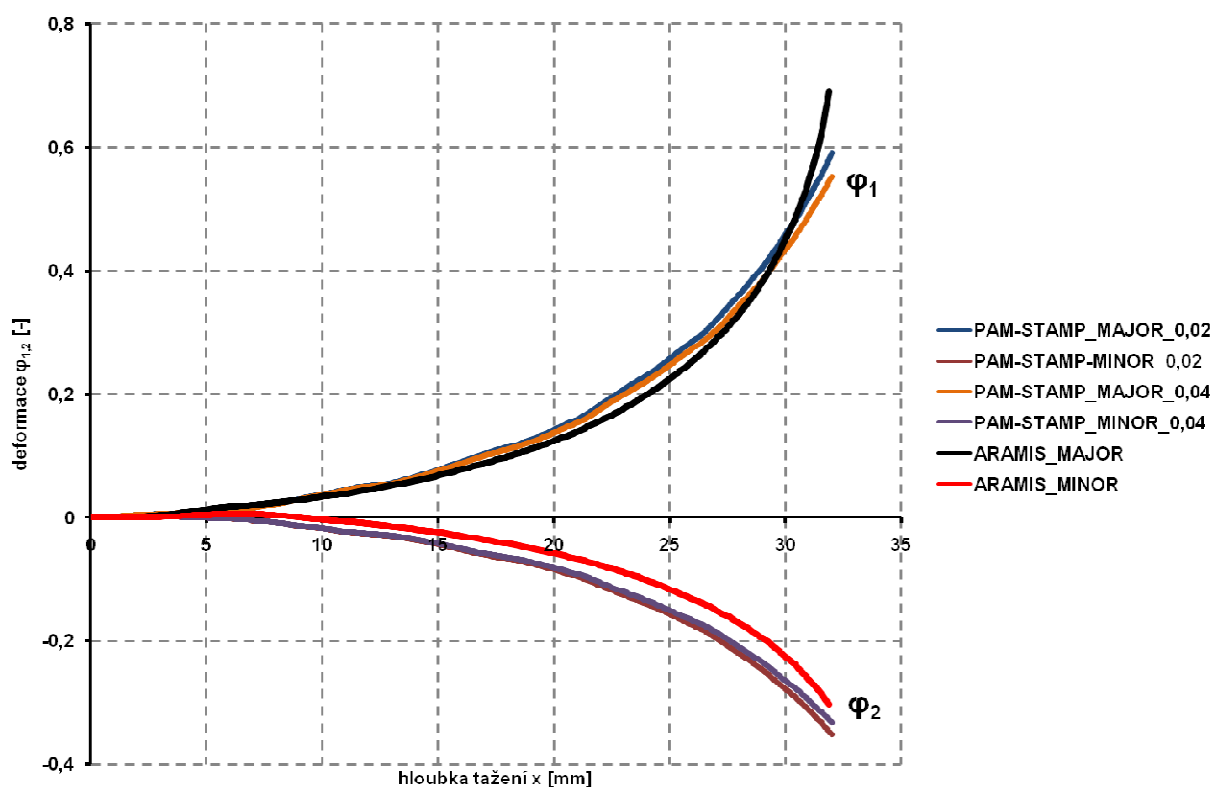
**Obr. 3.3.14:** Numerický model vedlejší (MINOR) deformace vzorku širokého 30 mm



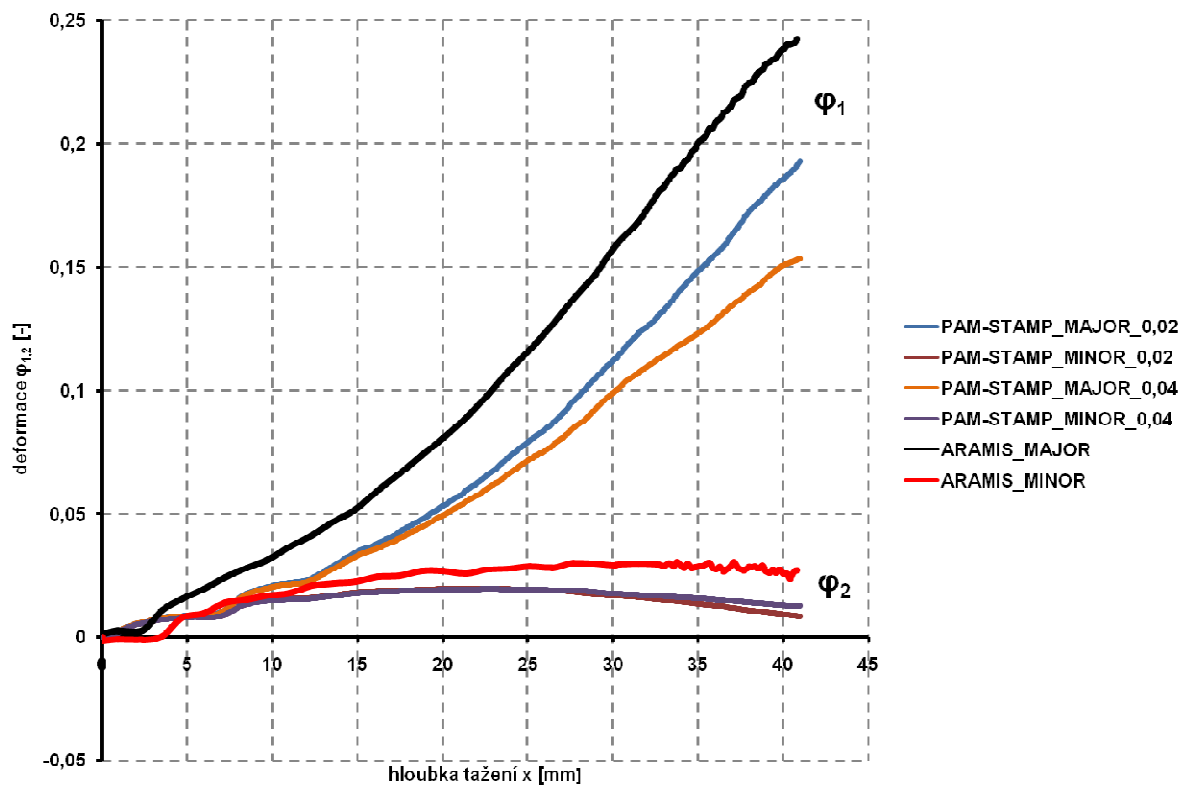
**Obr. 3.3.15:** Element vybraný na vzorku širokém 30 mm pro vykreslení křivek deformací



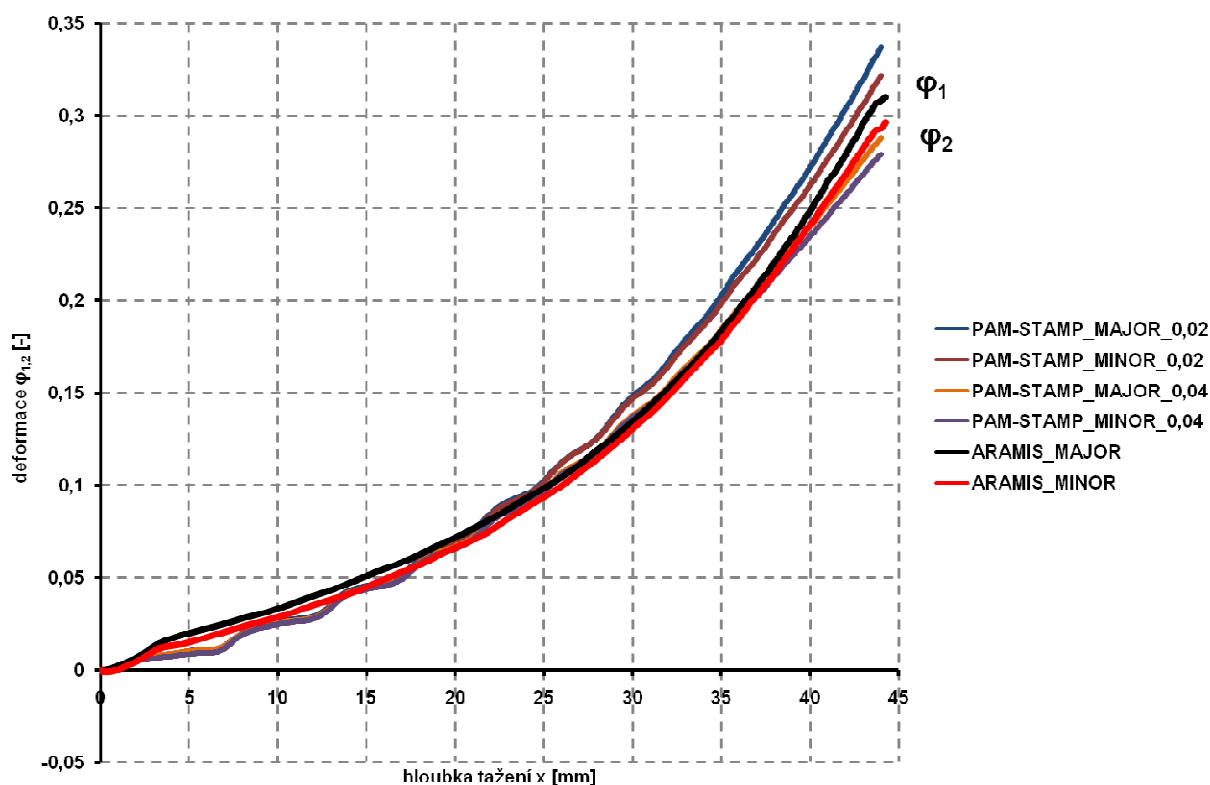
**Obr. 3.3.16:** Vykreslené křivky deformací pro vzorek 30 mm



**Obr. 3.3.17:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem pro šířku můstku 30 mm

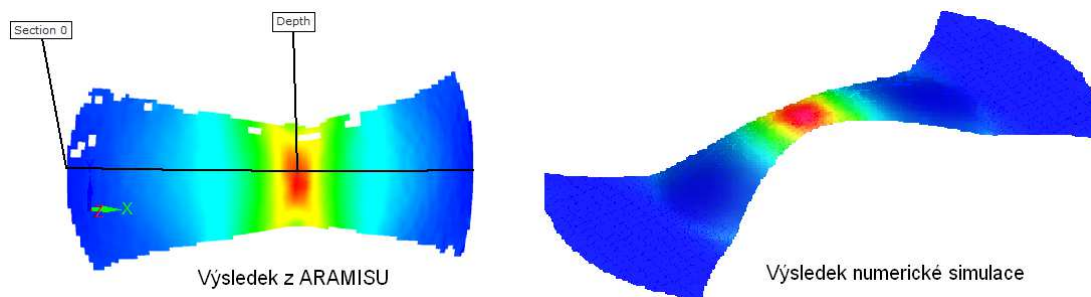


**Obr. 3.3.18:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem pro šířku můstku 120 mm

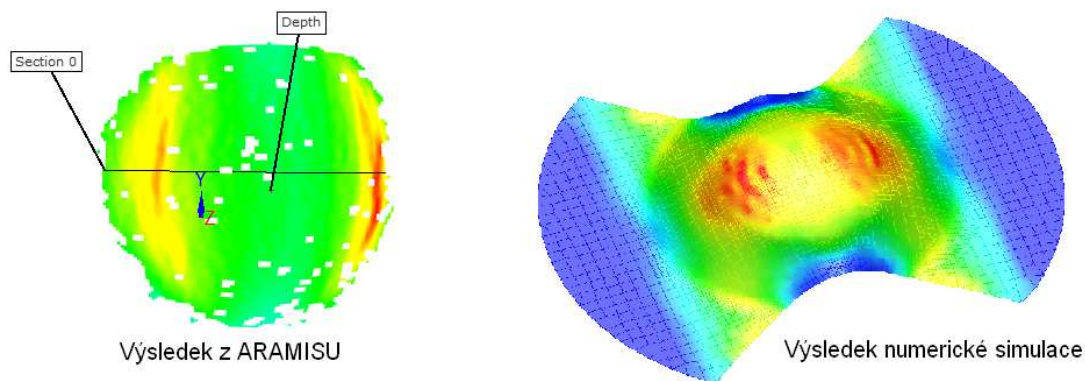


**Obr. 3.3.19:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem pro šířku můstku 210 mm

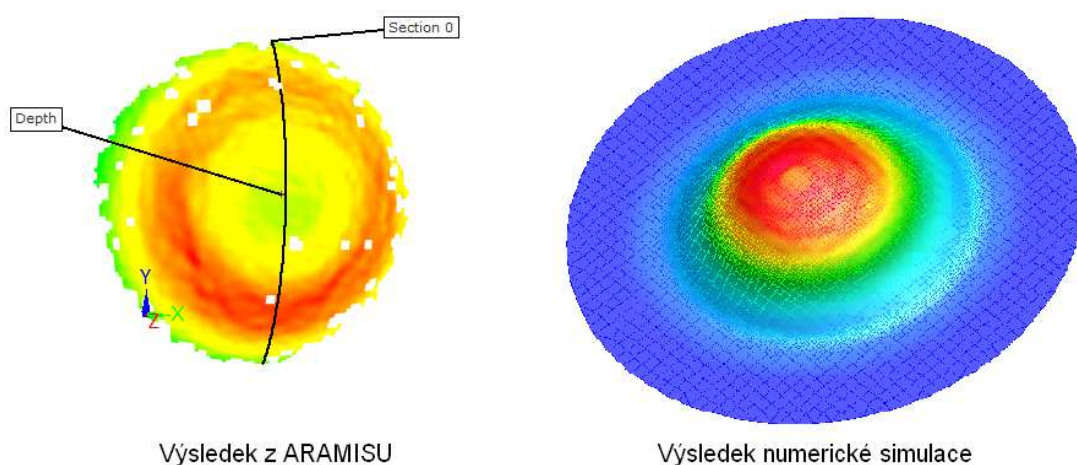
Pokud porovnáme průběhy křivek hlavních a vedlejších deformací zjistíme, že se průběhy téměř neliší. Jedinou výjimku tvoří šířka můstku 120 mm, což lze připsat jiné oblasti vzniku největších deformací při numerické simulaci. Pro snadnější pochopení jsou na následujících obrázcích zobrazeny vzorky po procesu tažení nasnímané optickým systémem ARAMIS a výsledky numerické simulace. Oblasti vzniku největších deformací, které vedou ke vzniku trhliny, jsou zobrazeny červenou barvou.



**Obr. 3.3.20:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 30 mm



**Obr. 3.3.21:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 120 mm



**Obr. 3.3.22:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 210 mm

### 3.3.4 Simulace deformace pomocí dat za mezí pevnosti

Provedení této simulace se v zásadě neliší od způsobu, jenž byl popsán v kapitole 3.3.3. Jediným rozdílem bylo použití dat z nehomogenní oblasti za mezí pevnosti při zkoušce tahem. Tahovou zkoušku v rámci své diplomové práce provedl a data poskytl student Bc. Lukáš Horák, který celý průběh tahové zkoušky snímal a vyhodnocoval pomocí systému ARAMIS. K popisu postupu získání dat v oblasti krčku jsem čerpal z diplomové práce pana Horáka a stručně jej uvedu na následujících řádcích:

„K výpočtu skutečného přetvoření  $\varphi$  v oblasti za mezí pevnosti bylo třeba zjistit okamžitý průřez  $S$ , sílu  $F$  a přetvoření ve směru vedlejší přetvoření ve směru šířky  $\varphi_3$  v každém ze zvolených okamžiků za mezí

pevnosti. Pro každý měřený vzorek bylo za mezí pevnosti zvoleno deset bodů, ve kterých byla vypočítána skutečná hodnota napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$ . Ty pak byly vyneseny ve skutečném diagramu  $\sigma - \varphi$ . Dále byla provedena aproximace skutečného tahového diagramu dle ČSN ISO 10275 a EN 10130, k deseti vypočteným hodnotám skutečného napětí a přetvoření byly vyneseny do grafu i příslušné aproximované hodnoty. Z tohoto grafu je pak zřetelná odchylka mezi skutečnou a aproximovanou hodnotou napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$ . Aby bylo možné spočítat tyto hodnoty, bylo nutné z programu ARAMIS vyexportovat hodnoty hlavního přetvoření  $\varphi_1$  a vedlejšího přetvoření  $\varphi_2$ .“ [11]

Takto naměřená data se vyexportovala a bylo nutné z nich vykreslit aproximační diagramy závislostí skutečného napětí  $\sigma$  na skutečném napětí  $\varphi$ . Tyto diagramy jsou zobrazeny v příloze 5. Pomocí vztahu 29 se určila konstanta monotónního zpevnění  $C$  a exponent deformačního zpevnění  $n$ . Hodnota pro konstantu  $C$  a pro  $n$  je uvedena v tabulce 3. Před spuštěním simulace se do modelu pro výpočet křivky zpevnění dle Krupkowského zadala data konstant  $C$  a  $n$  z oblasti za mezí pevnosti, získaná z aproximace tahové zkoušky za mezí pevnosti. Zadáním těchto dat došlo k vykreslení aproximační křivky znázorněné na obrázku 3.3.24. Po vyplnění dat pro všechny tři šířky následovalo spuštění simulace, jejíž výsledky i s porovnáním křivek deformací ze systému ARAMIS jsou na obrázcích 3.3.25, 3.3.26, 3.3.27.

**Tab. 3:** Konstanty  $C$  a  $n$  z oblasti za mezí pevnosti

Směr	$n$ [-]	$C$ [MPa]
0°	0,240	535,1
45°	0,210	513,3
90°	0,188	488,7
$x_s$	0,212	511,6



**Material**

Name: DC\_05\_HORAK

Type: Standard steel

Mechanics: ☐ Thermal ☒ Metallurgy

Parameters:

E: 210.  $\nu$ : 0.3  $\rho$ : 7.8E-6

Plasticity law: Hill 48

☐ Ito-Goya plasticity  $K_c$ :

Anisotropic type: Orthotropic

r0: 1.877 r45: 1.494 r90: 2.29

☐ Non-associated plasticity: Experimental

Re0: Re45: Re90:

Defined in hardening curve

☐ Matern failure criterium 0 forming limit curve(s)

Parameters

Hardening curve

Definition: Points list

Name: DC\_05\_HORAK HC

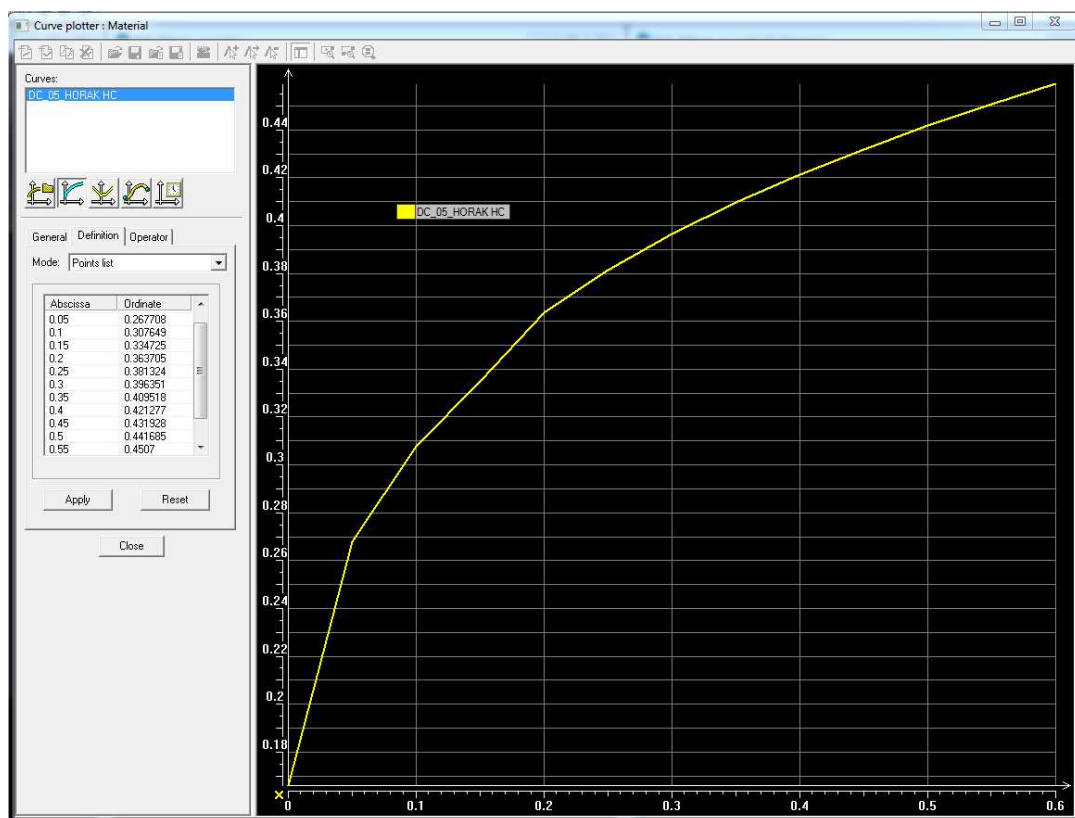
Kinematic model:

☐ Strain rate model:

Parameters

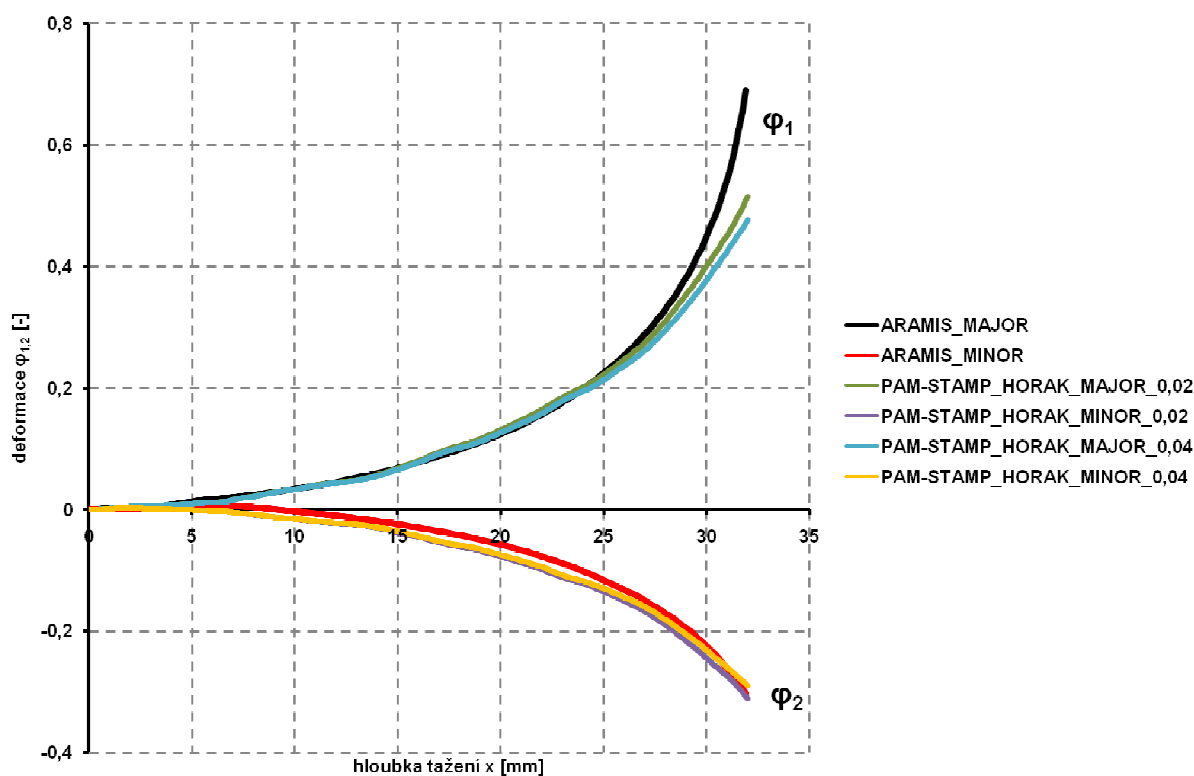
OK Cancel

Obr. 3.3.23: Materiálový list s vyplněnými hodnotami

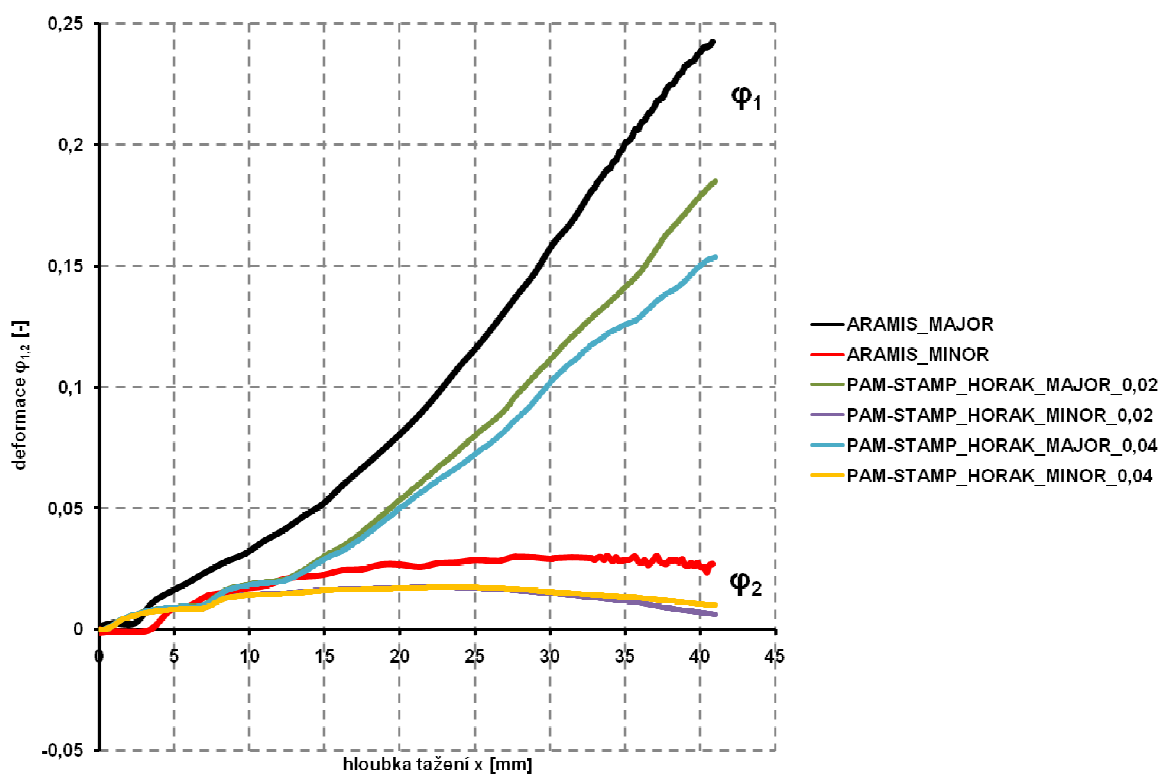


Obr. 3.3.24: Vykreslený průběh aproximační křivky dle Krupkowského

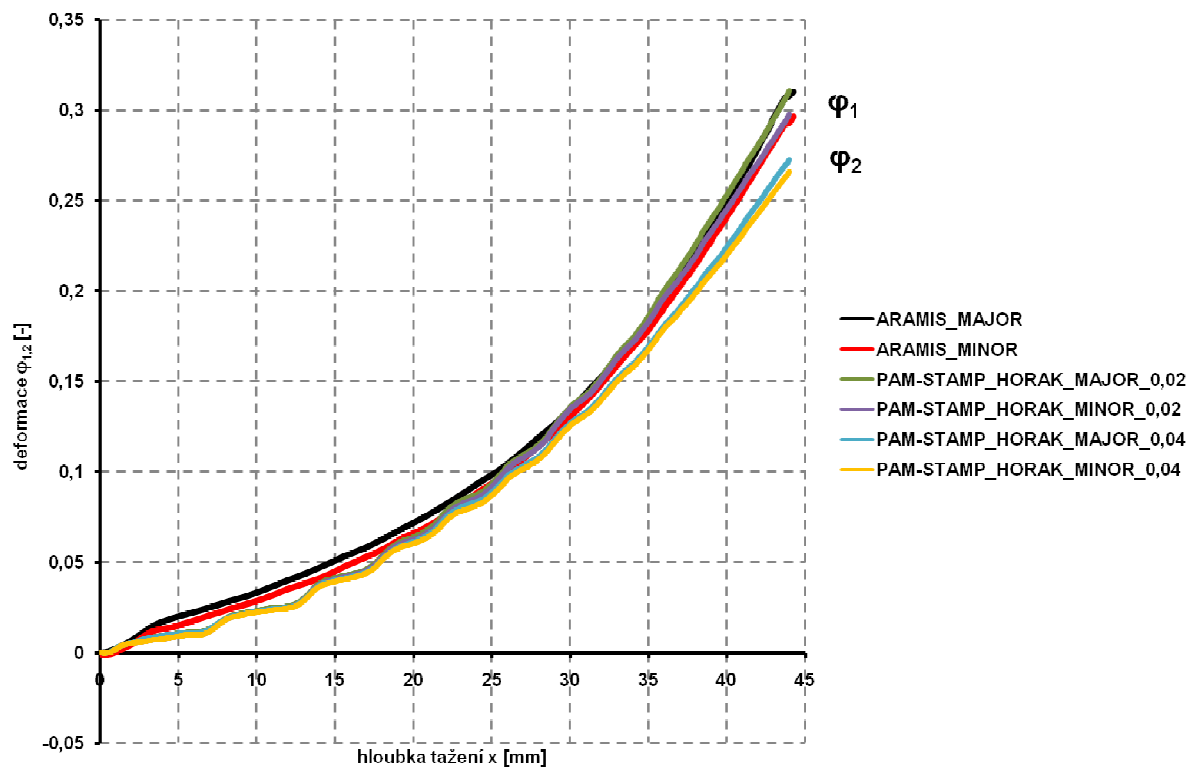




**Obr. 3.3.25:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem a daty v oblasti krčku pro šířku můstku 30 mm

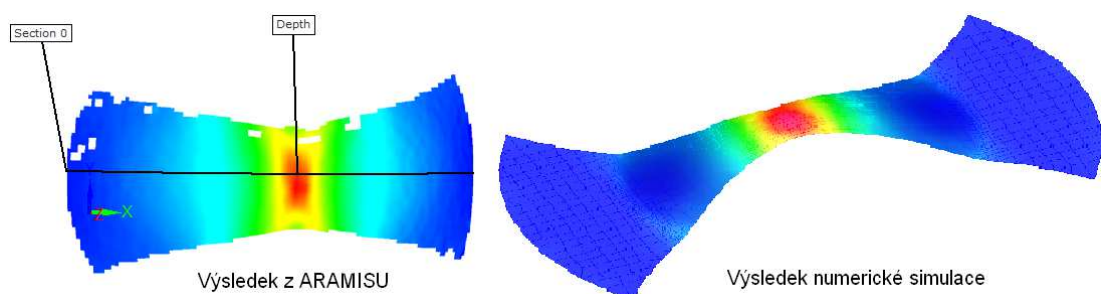


**Obr. 3.3.26:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem a daty v oblasti krčku pro šířku můstku 120 mm

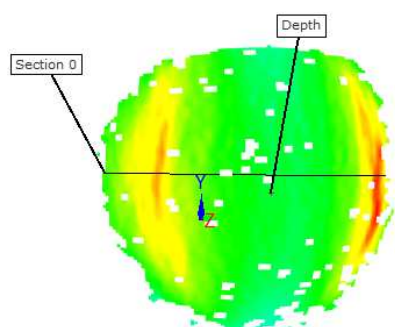


**Obr. 3.3.27:** Porovnání deformace zjištěné numerickou simulací s experimentálním způsobem a daty v oblasti krčku pro šířku můstku 210 mm

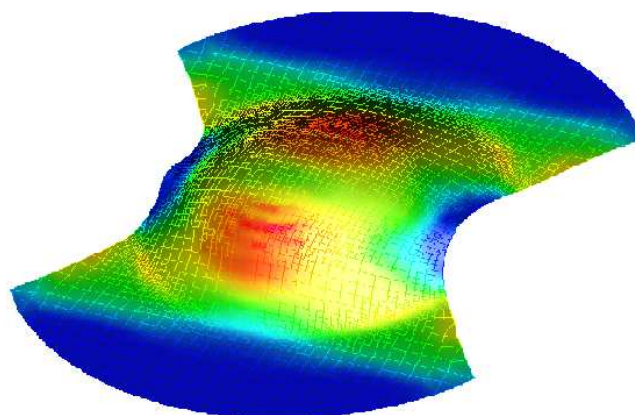
Pokud porovnáme průběhy křivek hlavních a vedlejších deformací zjistíme, že se průběhy téměř neliší. Jedinou výjimku opět tvoří šířka můstku 120 mm, což lze připsat opět jiné oblasti vzniku největších deformací při numerické simulaci. Pro snadnější pochopení jsou na následujících obrázcích zobrazeny vzorky po procesu tažení nasnímané optickým systémem ARAMIS a výsledky numerické simulace. Oblasti vzniku největších deformací, které vedou ke vzniku trhliny, jsou zobrazeny červenou barvou.



**Obr. 3.3.28:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 30 mm

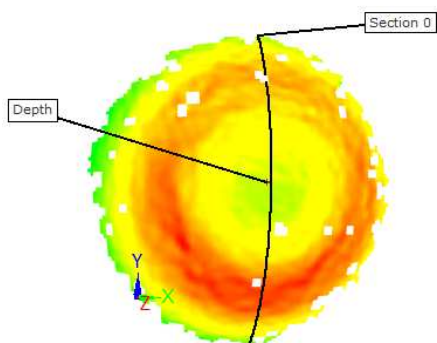


Výsledek z ARAMISU

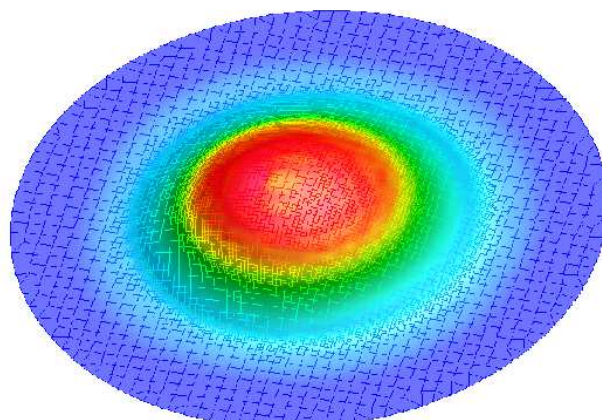


Výsledek numerické simulace

**Obr. 3.3.29:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 120 mm



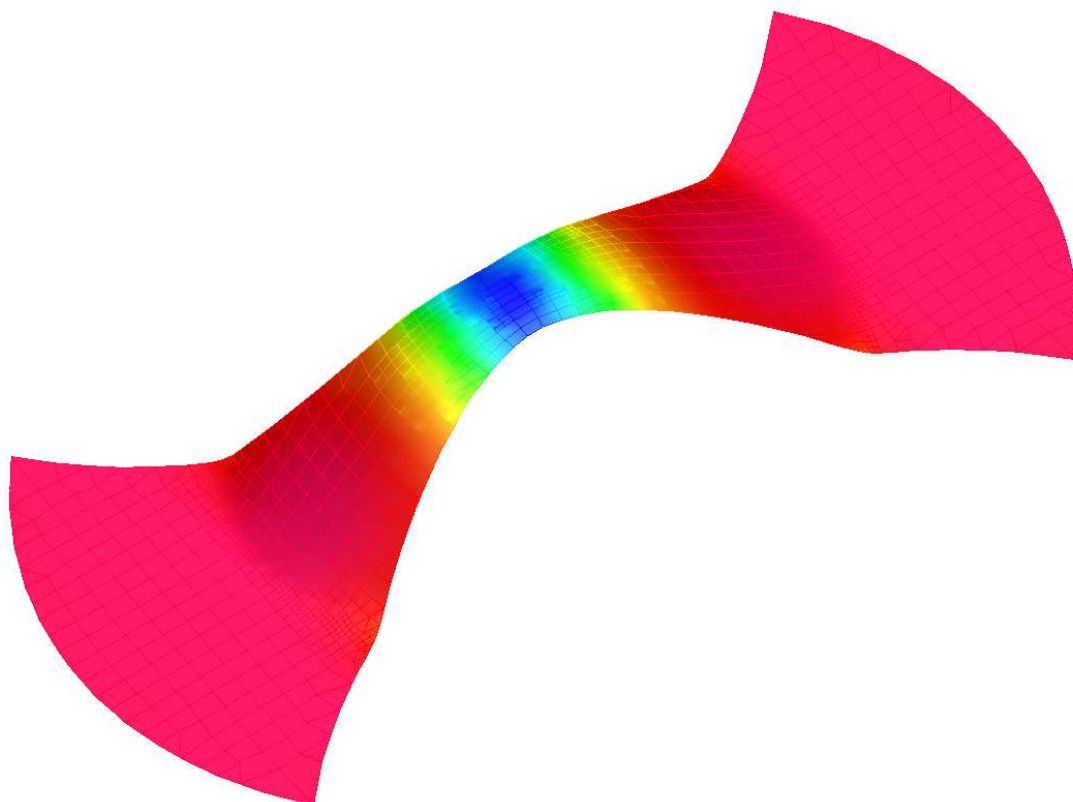
Výsledek z ARAMISU



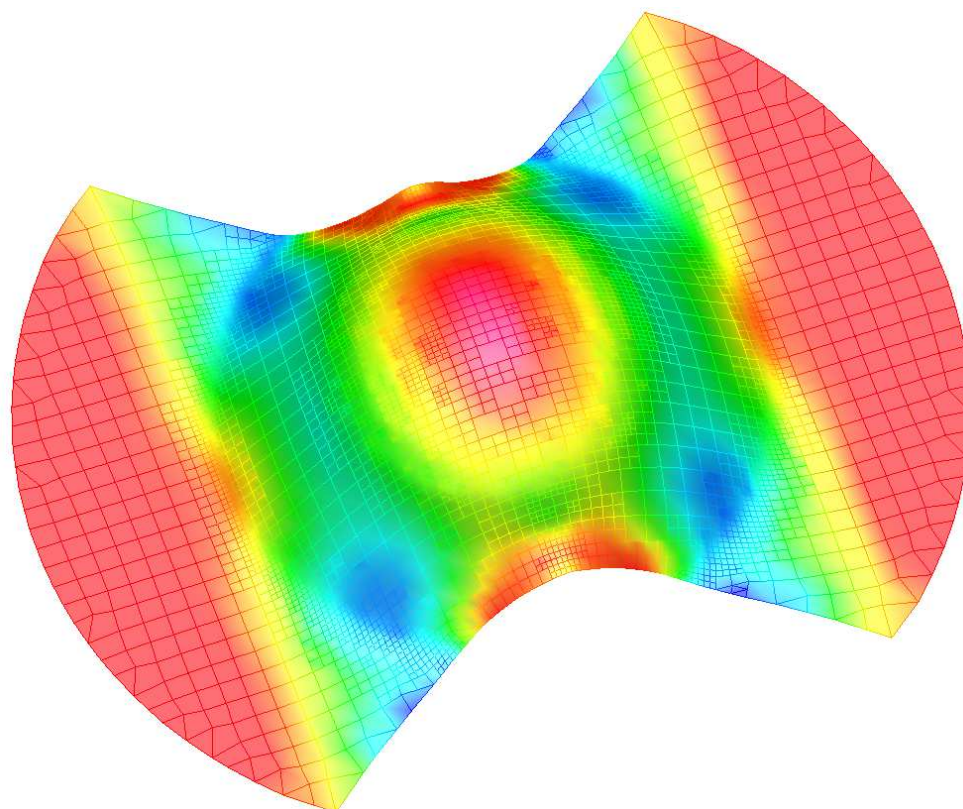
Výsledek numerické simulace

**Obr. 3.3.30:** Oblast vzniku největších deformací na šířce vzorku 210 mm

Pro úplnost jsou na následujících obrázcích zobrazeny výsledky numerické simulace pro vedlejší deformaci, na kterých je vidět, jak se výraznou měrou se mění napjatost v závislosti na šířce můstku vzorku.

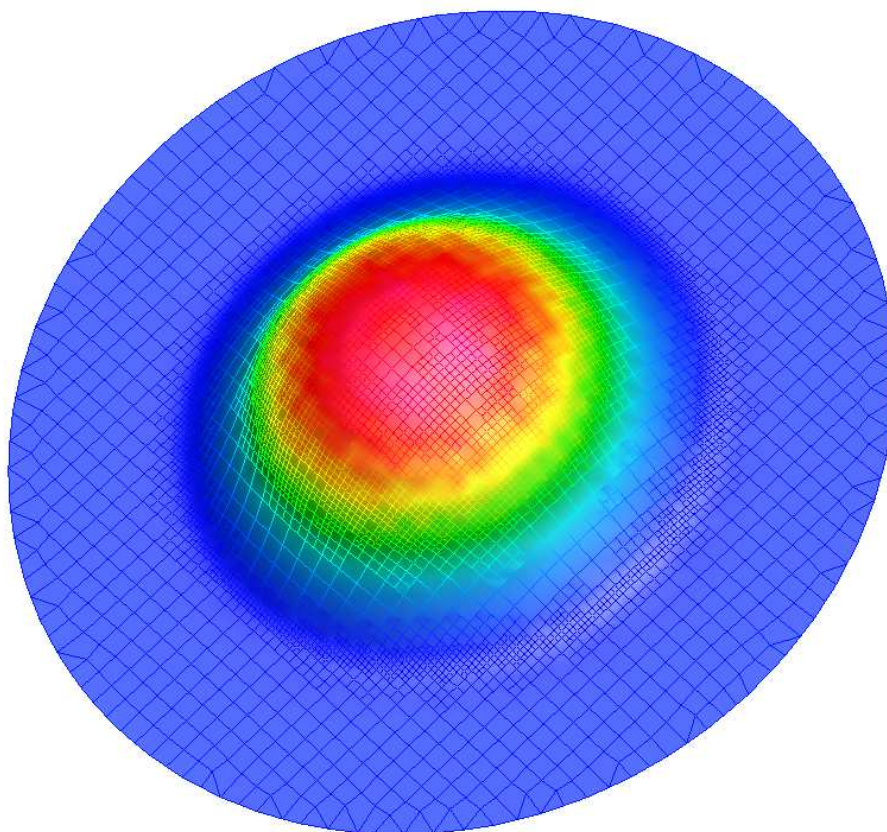


**Obr. 3.3.31:** *Oblast vzniku vedlejších deformací na šířce vzorku 30 mm*



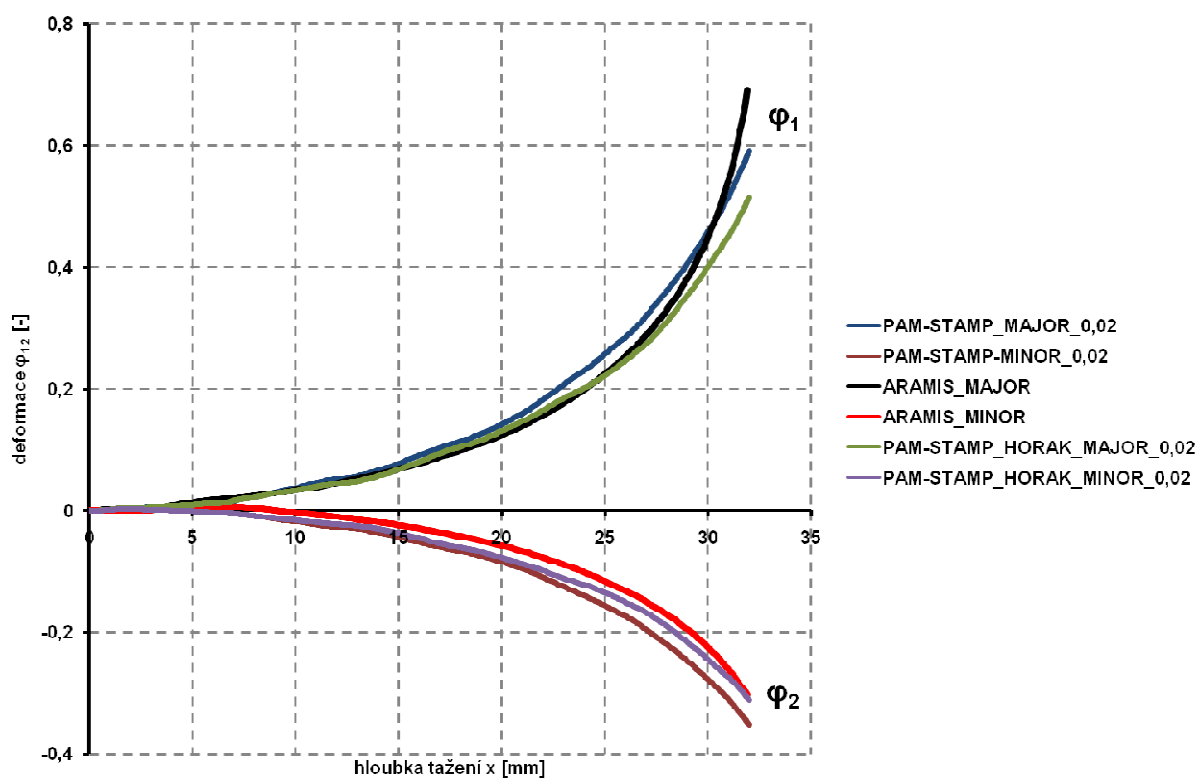
**Obr. 3.3.32:** *Oblast vzniku vedlejších deformací na šířce vzorku 120 mm*



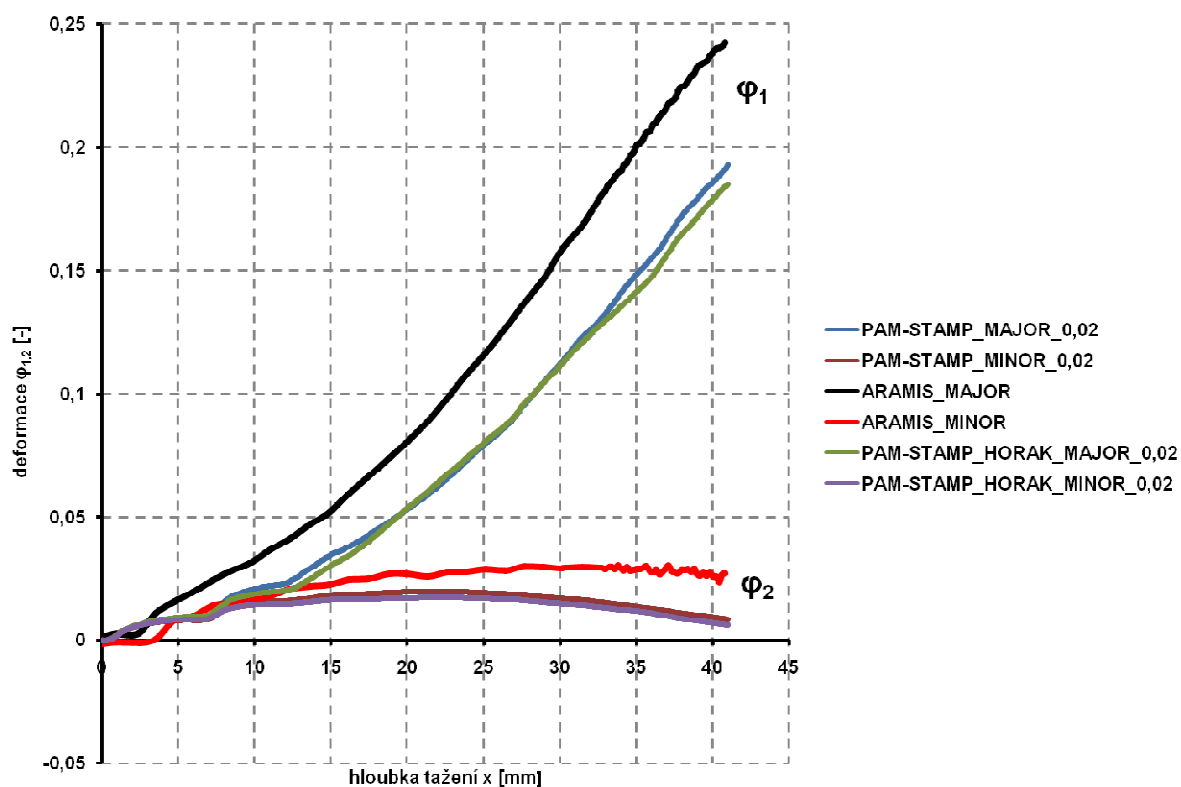


**Obr. 3.3.33:** *Oblast vzniku vedlejších deformací na šířce vzorku 210 mm*

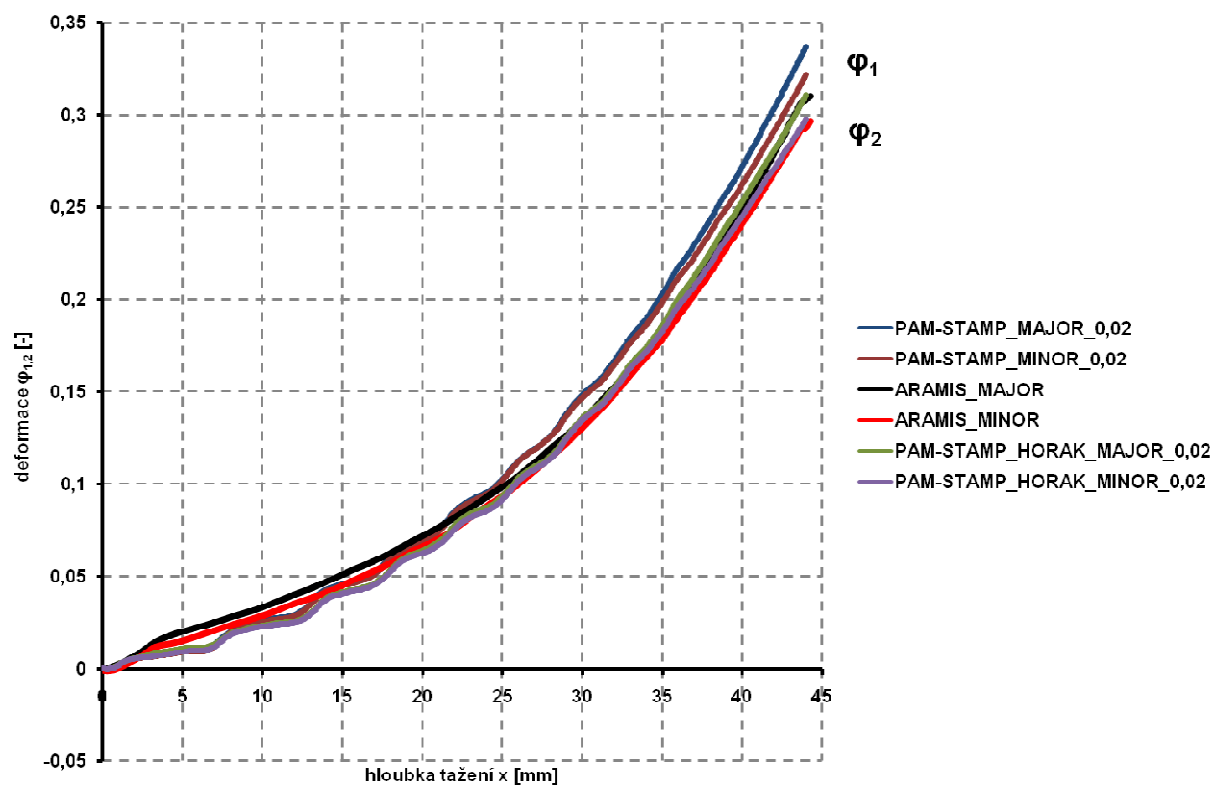
Na následujících grafech je zobrazeno porovnání průběhů deformací vzniklých snímáním optickým systémem ARAMIS a numerickou simulací při stejném koeficientu tření. Při numerické simulaci se použil výpočtový model vycházející ze statické zkoušky tahem (PAM – STAMP) a výpočtový model vycházející z dat v oblasti nestabilních deformací (PAM – STAMP\_HORAK). Z průběhu křivek lze usuzovat, že zvolený výpočtový model nemá výrazný vliv na výsledek numerické simulace. Mnohem větší vliv bude mít volba koeficientu tření.



**Obr. 3.3.34:** Porovnání vlivu zvoleného výpočtového modelu při numerické simulaci na výsledek deformace pro šířku můstku 30 mm



**Obr. 3.3.35:** Porovnání vlivu zvoleného výpočtového modelu při numerické simulaci na výsledek deformace pro šířku můstku 120 mm



**Obr. 3.3.36:** Porovnání vlivu zvoleného výpočtového modelu při numerické simulaci na výsledek deformace pro šířku můstku 210 mm

## 4 Diskuze výsledků

Při porovnávání křivek hlavních (MAJOR) a vedlejších (MINOR) deformací naměřených pomocí optického systému ARAMIS a křivek vzniklých pomocí numerické simulace v programu PAM – STAMP™ 2G se pro šířku můstku 30 mm a 210 mm nezjistila závažná nepřesnost či odchylka od reálného výsledku. Veliká nepřesnost se zaznamenala u šířky můstku 120 mm. Důvodem této odchylky je odlišná oblast vzniku největších deformací, jenž vede ke vzniku trhliny. Při numerické simulaci vznikla tato oblast na jiném místě než v reálném případě, což je patrné z obrázků dodaných pro porovnání. I když při tváření má veliký vliv koeficient tření, tak ani jeho změnou při numerické simulaci nedochází k výrazné změně průběhů křivek hlavní a vedlejší deformace. Na druhou stranu byl použit koeficient tření značně malý a to je také důvod, proč nedošlo k výrazné změně průběhu deformace. Na průběh deformace má také výrazný vliv rychlost tváření a tlak přidržovače, ale v našem případě se tyto parametry neměnili, takže tuto odchylku jim nelze přisuzovat. Změna průběhu deformace by se dala pochopit za mezí pevnosti v oblasti tvorby krčku, kdy dochází k nestabilitě deformací, ovšem v případě šířky můstku 120 mm se jedná o odchylku v průběhu celé deformace. Přesnost numerického výpočtu je z velké míry ovlivněna zvoleným modelem zpevnění tvářeného materiálu, ale při použití stejného modelu zpevnění u šířky můstku 30 mm a 210 mm nedošlo k takové odchylce jako u šířky 120 mm.

Při použití dat z oblasti tvorby krčku byly výsledky experimentu podobné jako při použití dat získaných z oblasti před tvorbou krčku u tahové zkoušky materiálu zvoleného k experimentu. Opět nastala výrazná odchylka v celém průběhu deformace pro šířku můstku 120 mm. U šířek můstků 30 mm a 210 mm nenastaly výrazné odchylky v průbězích deformace. Pro tuto metodu platí tedy stejné závěry, jaké byly popsány o pár řádků výše.



## 5 Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo testovat možnost numerické simulace v oblastech mezních stavů deformace materiálu. Pro testy byl zvolen hlubokotažný materiál DC 05 + ZE 75/75 – BPO. Experimentální měření rozvoje deformace bylo provedeno metodou vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou a průběh testu byl snímán optickým měřicím systémem ARAMIS. Pro shodné podmínky byla provedena i numerická simulace v programu PAM – STAMP<sup>TM</sup> 2G, kde byly voleny dva výpočtové modely při zadávání vstupních materiálových dat. První materiálový model vycházel z naměřených dat ze statické zkoušky tahem. Pro druhý výpočtový model byly využity výsledky diplomové práce Bc. Horáka, kde byla křivka zpevnění tvářeného materiálu zjišťována i v oblasti mezních deformací za mezí pevnosti při statické zkoušce tahem.

Z naměřených výsledků je patrné jemné kmitání průběhů deformace zjištěných numerickou simulací. Je to dáno přesítováním elementů deformační sítě a absolutní velikostí sítě zvolené při numerické simulaci. Velikost elementu při numerické simulaci je řádově větší než velikost elementu, která je používána při analýze systémem ARAMIS. Systém ARAMIS umožňuje velmi přesnou analýzu deformace nejen v oblastech homogenní deformace ale i v místech bezprostředně sousedících s trhlinou. Z naměřených průběhů deformace je patrné, že v oblasti homogenních deformací jsou průběhy zjištěné experimentálně a pomocí numerické simulace prakticky totožné a výsledky se zásadě neliší. S rostoucí deformací se odchylky zvyšují až do okamžiku vzniku trhliny na vzorku. Rozdíly mezi naměřenými hodnotami a hodnotami získanými pomocí numerické simulace jsou vyšší v případě použití výpočtového modelu vycházejícího pouze z dat získaných ze statické zkoušky tahem. V případě použití výpočtového materiálového modelu vycházejícího z dat získaných přímo v oblasti nestabilních deformací došlo k zpřesnění výsledků numerické simulace. Z průběhů křivek na obrázcích 3.3.17, 3.3.18, 3.3.19, 3.3.25, 3.3.26 a 3.3.27 je patrné, že výsledky měření silně ovlivňuje i zvolená hodnota koeficientu tření mezi tvářeným materiálem a nástrojem. Při porovnání křivek zobrazených na obrázcích 3.3.17, 3.3.18, 3.3.19, 3.3.25, 3.3.26 a 3.3.27

s křivkami na obrázcích 3.3.34, 3.3.35, 3.3.36 je vidět, že volba koeficientu tření v našem případě ovlivňuje přesnost výsledku výrazněji než volba materiálového modelu. Tento fakt je zvláště patrný pro šířku vzorku 120 mm, kde vlivem tření nedošlo ke vzniku trhliny v místě s největší hloubkou tažení a výrazně to ovlivňuje průběh hlavních deformací.

Použití metody numerické simulace je výhodné z hlediska snadného vyhodnocení výsledků a snadné změny parametrů tváření, při zachování veliké přesnosti výsledků. Další výhodou numerické simulace je rychlá příprava pokusu, kdy stačí vykreslit potřebné nástroje a zadat parametry procesu. Pro hovoří také možnost vyvolání uložené simulace z paměti počítače kdykoli je třeba a to i pro případ simulace jiného materiálu. Z výsledků měření provedených v rámci vypracování předkládané diplomové práce je vidět vysoká citlivost numerické simulace na definici vstupních hodnot, zvláště pak korektního zadání koeficientu tření a křivky zpevnění.

## 6 Použitá literatura

- [1] LENFELD, P.: *Technologie II – 1. část (Tváření kovů)*, skripta FS TU Liberec, Liberec, 2005, [cit. 2011-04-30].
- [2] Kolektiv autorů: *Lisování*, SNTL Brno, 1971, [cit. 2011-04-30].
- [3] PETRUŽELKA J.: *Technologická tvářitelnost při plošném tváření* [online], VSB TU Ostrava, [cit. 2011-04-30], dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/TNMTV/8TvZkPlosna.pdf>
- [4] HRUBÝ J.: *Anizotropie* [online], VSB TU Ostrava, [cit. 2011-04-30], dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/11Anizotrop.pdf>
- [5] Kolektiv autorů: *Tribologie* [online], FS TU Liberec, [cit. 2011-04-30], dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/ttv/tribologie.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf)
- [6] SOLFRONK P.: *Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu*. Disertační práce, Liberec: TU v Liberci 2003, [cit. 2011-04-30].
- [7] Společnost MCAE – 3D digitální technologie, [cit. 2011-04-30], dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [8] PETRUŽELKA J.: *Limitní diagramy – experiment* [online], VSB TU Ostrava, [cit. 2011-04-30], dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/TNMTV/7TvFLDexper.pdf>
- [9] Kolektiv autorů: *Metody tváření kovů* [online], FS TU Liberec, [cit. 2011-04-30], dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/MTK3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf)
- [10] www.mmspektrum.com: Počítačová simulace tváření plechu, [cit. 2011-04-30], dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu>
- [11] HORÁK L.: *Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2011.
- [12] ISO/DIS 12004-2: *Metallic materials -Sheet and strip – Determination of forming limit curves – Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory*, 2006.
- [13] ČSN EN – ISO 6892-1: *Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, 2009.

- [14] POSPÍCHAL D.: *Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2009.
- [15] Společnost GOM – Optical Measuring Techniques, dostupné z:  
< <http://www.gom.com/> >
- [16] TMĚJ J., MIKEŠ V.: *Teorie tváření*, Vysoká škola strojní a textilní Liberec, 1990.
- [17] TMĚJ J.: *Tváření kovů: Vybrané statě z teorie*, VŠST Liberec, 1977.
- [18] TIŠNOVSKÝ M: *Hluboké tažení plechu na lisech*, SNTL Praha, 1990.

## **7 Seznam příloh**

**Příloha 1:** Diagramy závislostí  $R - \varepsilon$  statické zkoušky tahem

**Příloha 2:** Diagramy závislostí  $\sigma - \varphi$  statické zkoušky tahem

**Příloha 3:** Aproximační diagramy statické zkoušky tahem z oblasti tvorby krčku

**Příloha 4:** Reporty ze systému ARAMIS pro šířky můstků 120 mm a 210 mm

**Příloha 5:** Aproximační diagramy statické zkoušky tahem pro směr  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  (na přiloženém CD)

## Příloha 1: Diagramy závislostí $R - \epsilon$ statické zkoušky tahem

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC05 + ZE 75/75 BPO

Norma: : EN 10152

Rozměr vzorku: : [0,81 x 20] mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Vypracoval: : Ladislav Lesák

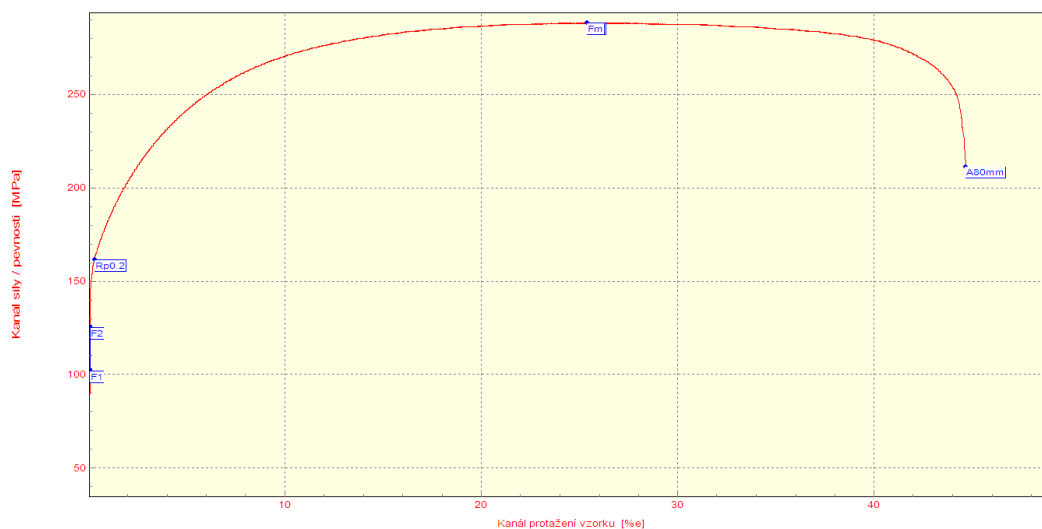
Datum zkoušky: : 10.11. 2010

Směr odebrání vzorku : 0°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	161.8	288.1	25.21	44.53
2	157.7	280.8	25.17	44.75
3	162.1	287.4	25.29	44.35
4	162.1	288.5	25.15	44.70
5	157.5	280.4	25.23	44.86
6	162.0	287.1	25.25	44.30

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Průměrná hodnota	160.5	285.4	25.22	44.58
Směrodatná odchylka	2.3	3.8	0.05	0.23



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC05 + ZE 75/75 BPO

Norma: : EN 10152

Rozměr vzorku: : [0,81 x 20] mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Vypracoval: : Ladislav Lesák

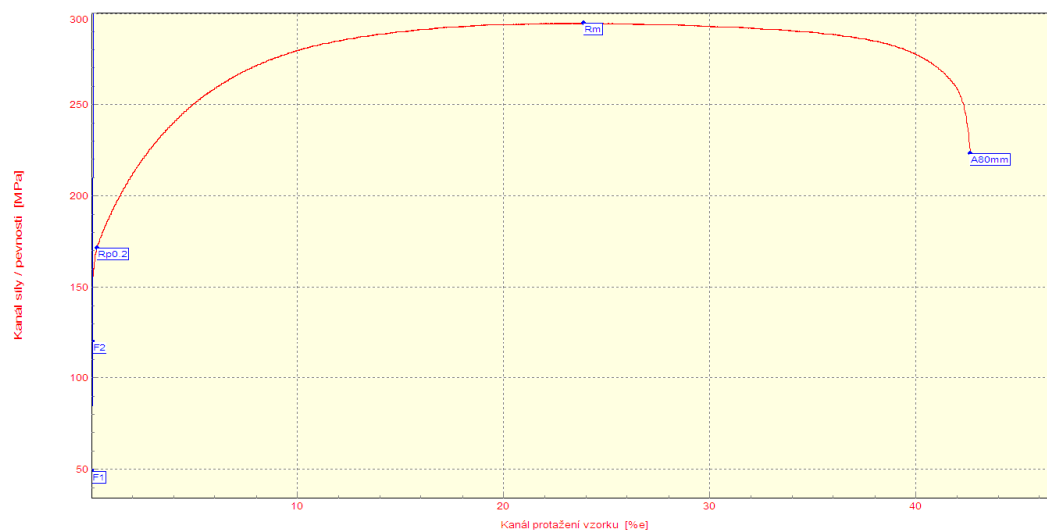
Datum zkoušky: : 10.11. 2010

Směr odebrání vzorku : 45°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	171.4	294.5	23.75	42.54
2	169.3	290.8	22.42	40.45
3	169.7	290.8	22.81	42.55
4	171.7	294.8	23.71	42.80
5	169.8	290.6	22.82	42.61
6	169.7	290.5	22.74	42.45

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Průměrná hodnota	170.3	292.0	23.04	42.23
Směrodatná odchylka	1.0	2.1	0.55	0.88



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

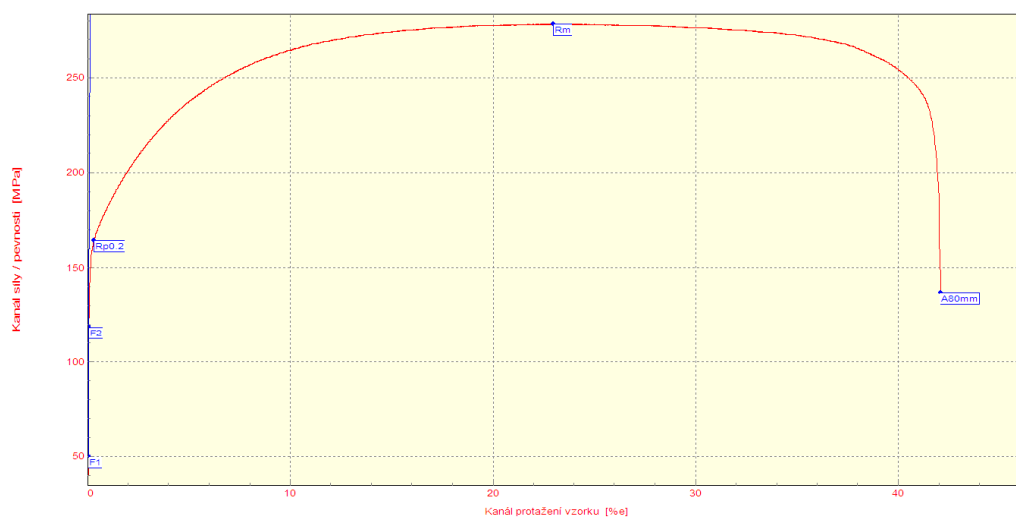
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC05 + ZE 75/75 BPO  
Norma: : EN 10152  
Rozměr vzorku: : [0,81 x 20] mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Vypracoval: : Ladislav Lesák  
Datum zkoušky: : 10.11. 2010  
Směr odebrání vzorku : 90°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	164.2	278.2	22.81	42.01
2	168.0	283.0	23.35	42.68
3	166.7	281.4	22.31	41.37
4	164.2	277.9	22.73	41.90
5	168.5	283.3	23.39	42.79
6	166.9	281.3	22.32	41.42

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Průměrná hodnota	166.4	280.9	22.82	42.03
Směrodatná odchylka	1.9	2.3	0.47	0.60



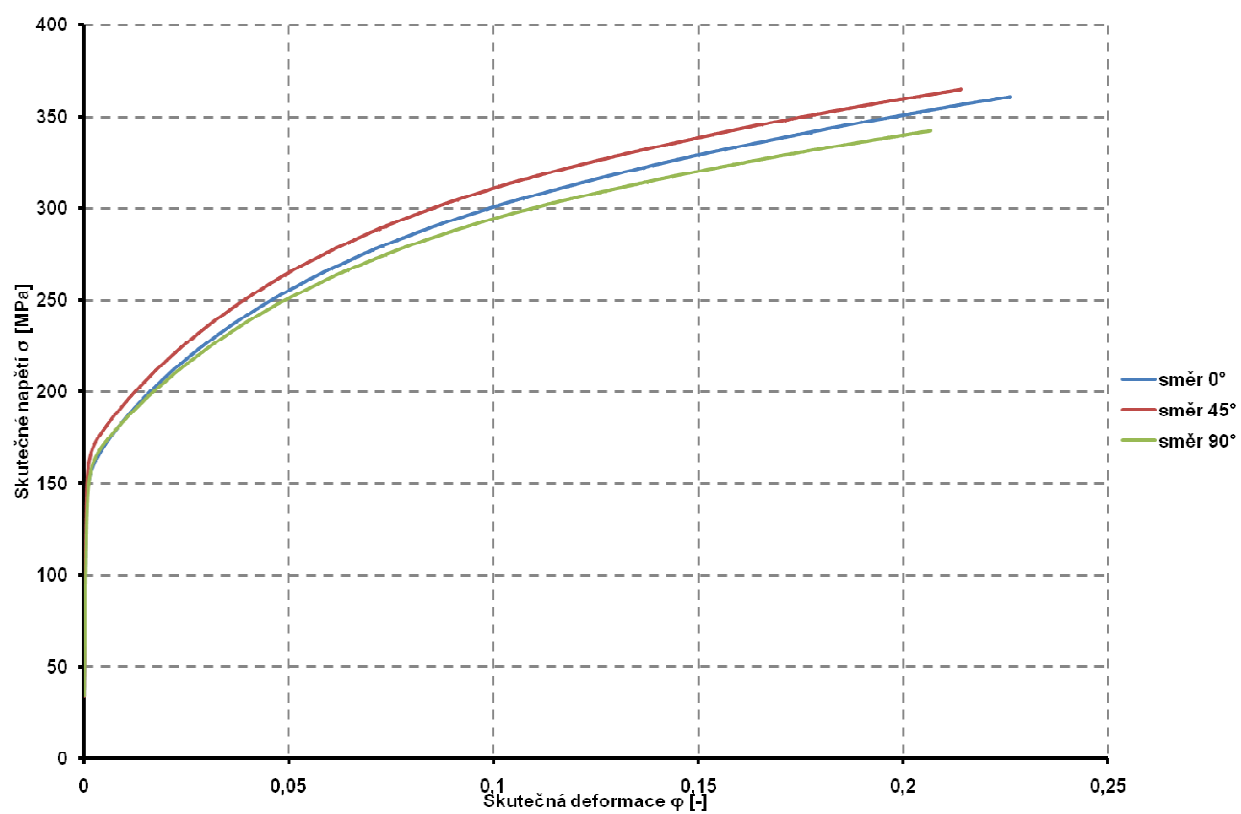
### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

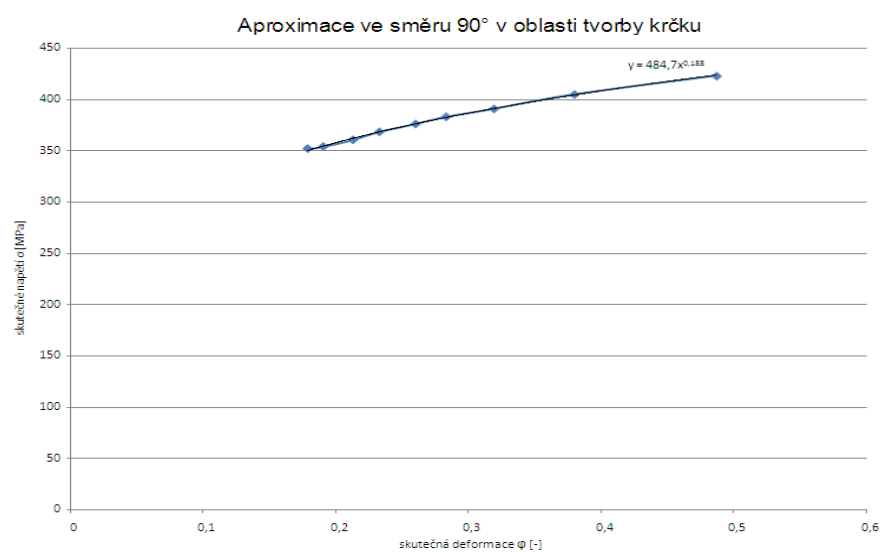
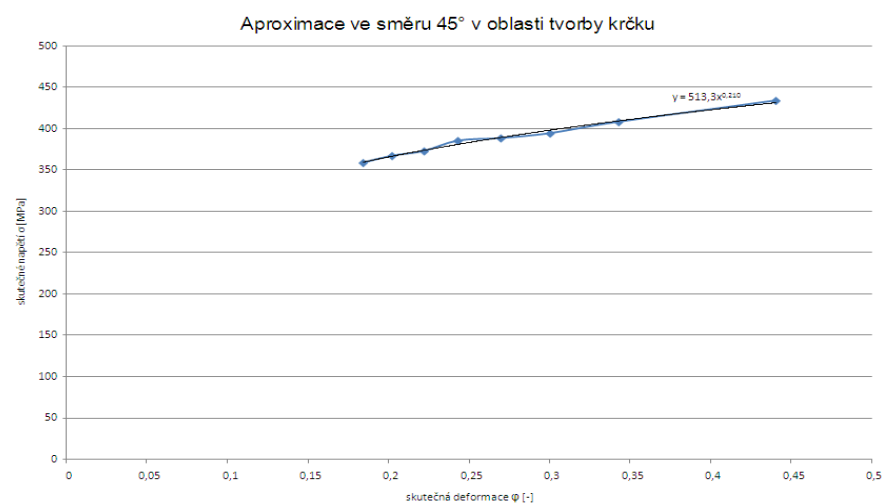
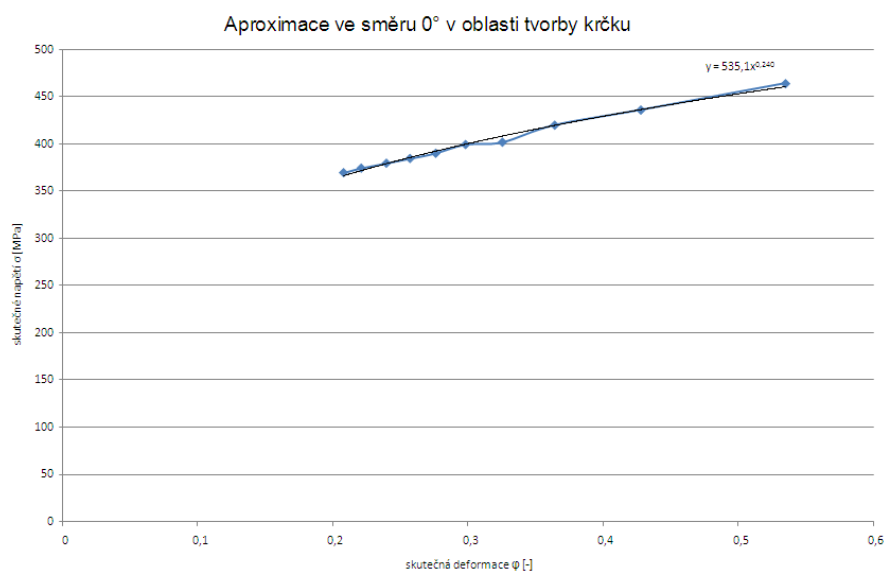
<http://www.ksp.tul.cz>



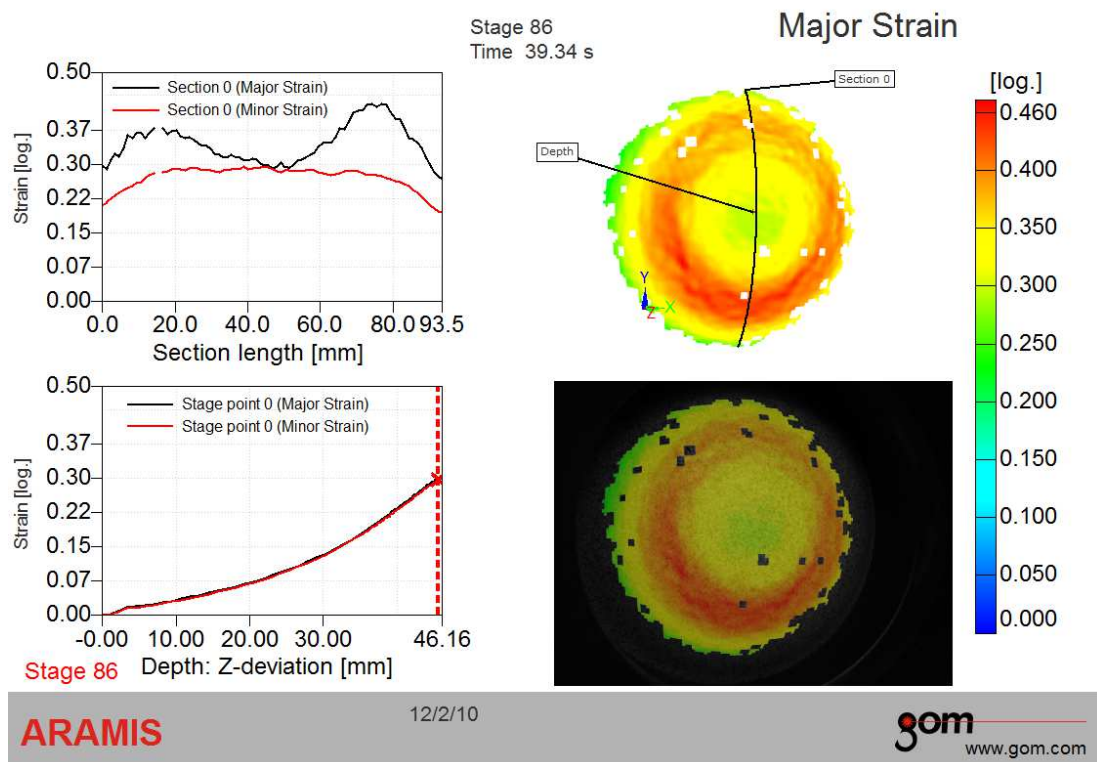
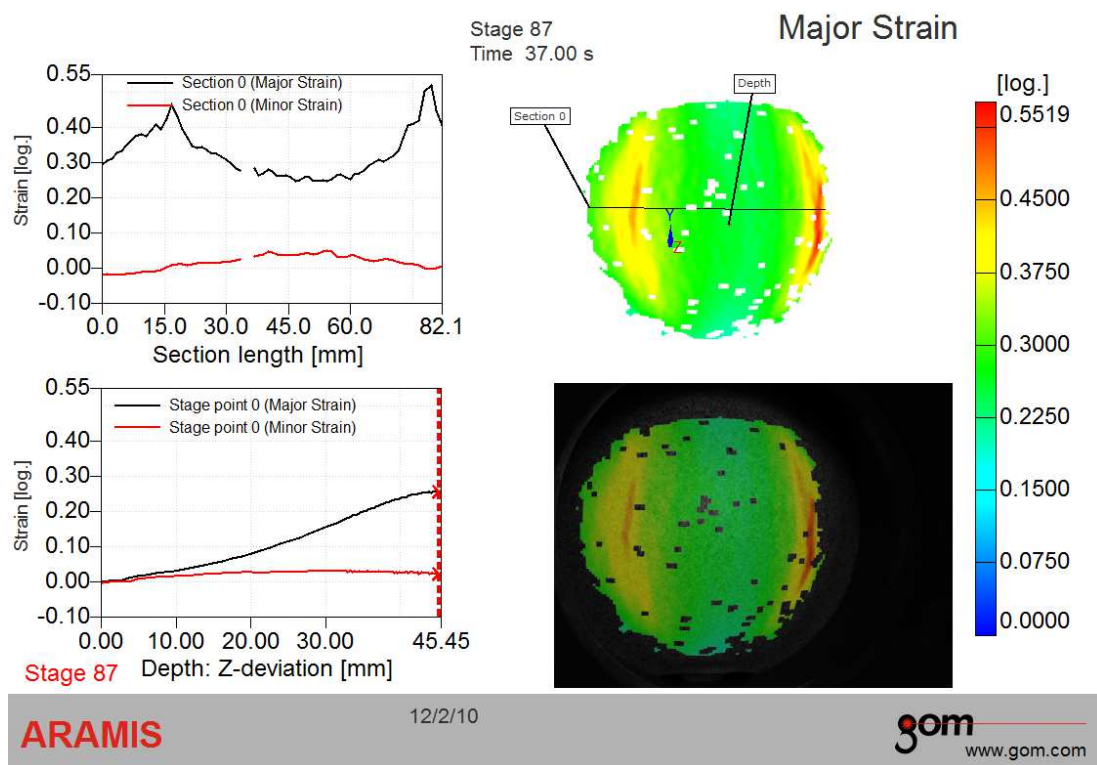
## Příloha 2: Diagramy závislostí $\sigma - \varphi$ statické zkoušky tahem



### Příloha 3: Aproximační diagramy statické zkoušky tahem z oblasti tvorby krčku



#### Příloha 4: Reporty ze systému ARAMIS pro šířky můstků 120 mm a 210 mm



## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 6. ledna 2012

.....

Ladislav Lesák

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a konsultant.

In Liberec, 6th January 2012

.....  
Ladislav Lesák